СБОРНИК ДОКЛАДОВ

МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

НИЯУ МИФИ

ФРТИ

XX

Всероссийская молодежная научная школа-конференция
«Математика и математическое моделирование»
1-3 апреля 2026 г.

Саров 2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ МИФИ
САРОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЯУ МИФИ

Сборник материалов XX
Всероссийской молодёжной
школы-конференции

МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1 - 3 апреля 2026 г.

Саров
Интерконтакт
2026

УДК 5
ББК 30-1
В60

Математика и математическое моделирование : Сборник материалов XX Всероссийской молодёжной научной школы-конференции. – Саров: «Интерконтакт», 2026. - 456с.

Настоящее издание является сборником докладов, представленных на XX Всероссийской молодежной научной школе-конференции «Математика и математическое моделирование», проведенной Саровским физико-техническим институтом НИЯУ МИФИ (г. Саров Нижегородской обл., СарФТИ НИЯУ МИФИ, 1 - 3 апреля 2026 г.).

Доклады подготовлены студентами, аспирантами, научными сотрудниками и преподавателями вузов РФ, специалистами и учеными ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», академических институтов, научных организаций, а также школьниками.

Сборник докладов охватывает широкий круг вопросов, связанных с современными методами математического моделирования физических, биофизических и химических процессов и явлений, безопасностью информационных и технологических систем, развитием методов и средств компьютерных и суперкомпьютерных вычислений, цифровизацией промышленных предприятий, использованием математических методов в экономике и социологии.

Труды, представленные в сборнике, могут быть интересны широкому кругу специалистов в области математического моделирования, а также студентам, аспирантам, инженерно-техническим и научным работникам, специализирующимся в данной области.

ISBN 978-5-6051820-6-1

Ответственный за выпуск -
руководитель СарФТИ НИЯУ МИФИ, к.ф.-м.н. Сироткина А.Г.
Дизайн и верстка Ломтева Е.Е., Асташкина А.М., дизайн-студия «Веер»

Материалы получены до 24.06.2026г. Отпечатано: ООО «Интерконтакт», г. Саров, ул. Герцена, 46, оф. 101. Подписано в печать 28.07.2026. Формат 60x84 1/8. Печ. л. 54,06. Тираж 50 экз.

Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ
607186, Саров, ул. Духова, 6, www.sarfti.ru
Организационный комитет: т. (83130)7-96-10,
e-mail: eelomteva@mephi.ru

Секция «Модели и методы цифровых технологий»

ТОНКАЯ НАСТРОЙКА МОДЕЛИ ЭМБЕДДИНГОВ ДЛЯ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОИСКА

Бондарев Д.Е.
Московский государственный университет им. Ломоносова филиал в г. Сарове

Современные системы информационного поиска всё чаще отказываются полагаться на одно лишь индексирование текста для последующего полнотекстового поиска. Если раньше для наиболее важных слов и фраз строились обратные индексы по всему корпусу документов [1], то теперь к этому добавляется векторный поиск, который основан на сравнении расстояний между векторами эмбеддингов, каждый из которых соответствует какому-либо текстовому фрагменту. Подобные системы часто применяются для создания закрытых поисковых систем по базам данных предприятия [2].

Ключевым компонентом, вносящим наибольший вклад в качество системы, является эмбеддинг-модель, отвечающая за представление текстов в виде вектора вещественных чисел. Она основана на архитектуре нейронной сети трансформер-энкодер [3]. На вход такой сети подается токенизированный текст, который проходит через множество слоев механизма внимания. Сам эмбеддинг является выходом с последнего скрытого слоя или результатом усреднения выходов. Именно поэтому близость векторов отражает семантическое сходство: сеть учится проецировать тексты с похожим смыслом в близкие точки многомерного пространства. Процесс обучения осуществляется методами стохастического градиентного спуска: веса сети итеративно модифицируются таким образом, чтобы минимизировать функцию потерь, смысл которой сократить расстояние между векторами семантически связанных текстов и увеличить его для различных по смыслу фрагментов.

В сообществе есть большие корпуса текстов, на которых обучается нейронные сети подобного типа. Такие датасеты не имеют особой направленности, и существуют для того, чтобы обучить универсальную модель, которая одинаково работала бы во всех предметных областях [4]. Если использовать обученную модель на этих датасетах, например, в специфичных медицинских текстах, нейронная сеть может не до конца хорошо ориентироваться в терминах и оборотах, и семантические вектора, сгенерированные этой моделью, могут не очень хорошо отражать смысл изначального текста.

В рамках данной работы предлагается методика тонкой настройки (дообучение) модели эмбеддинга перед ее развертыванием в промышленную эксплуатацию. Процесс дообучения нейронной сети осуществляется непосредственно на том корпусе документов, с которым системе предстоит работать в дальнейшем, что позволяет адаптировать веса модели под конкретную предметную область.

Этот процесс тонкой настройки модели будет аналогичен тому, как модель обучали до этого: модели будут предоставляться пары вопрос – ответ, и её задача будет, в случае, если ответ соответствует вопросу, сблизить эти вектора, а в противном случае - отдалить. Но мы, в отличие от первоначальных создателей модели, не располагаем готовыми датасетами для нашей базы данных, поэтому перед нами сначала стоит задача создать подобный набор пар вопрос-ответ, которые непосредственно относятся к предметной области качество работы над которой мы хотим улучшить у нашей модели эмбеддингов.

Для этого мы будем использовать небольшие языковые модели, которые можно запустить локально на персональном компьютере [5]. Мы разбиваем наши документы и тексты на фрагменты одинаковой величины и просим LLM сгенерировать несколько разнообразных вопросов по этому фрагменту текста, после чего сохраняем результат так, чтобы к каждому фрагменту текста было поставлено в соответствие несколько вопросов. Подобный синтетический датасет и будет использоваться для дообучения модели эмбеддинга [6].

$$L = -\frac{1}{B}\sum_{i=1}^{b} \ln \frac{e^{sim(a_i,p_i)}}{\sum_{j=1}^{b} e^{sim(a_i,p_j)}} \qquad (*)$$

где:

B – размер пакета

a_i – вектор эмбеддинга запроса (якоря) для i-го примера в батче.

p_i – вектор эмбеддинга правильного ответа (положительного) для i-го примера.

p_j – векторы ответов от других примеров в том же батче

sim(·,·) – функция косинусного сходства

Тонкая настройка нейронной сети выполняется с использованием функции потерь MultipleNegativesRankingLoss (*), целью которой является отдалить друг от друга вектора эмбеддингов для неправильных пар вопрос-ответ [7]. Для повышения эффективности обучения рекомендуется использовать максимально возможный размер пакета, допустимый объемом видеопамяти, что позволяет модели более качественно формировать семантические связи и улучшать точность последующего векторного поиска. Поскольку архитектура трансформеров требует выполнения огромного количества матричных операций, для ускорения скорости обучения и инференса необходимо использование графических ускорителей (GPU).

Для проведения экспериментов были протестированы множество open-source моделей эмбеддеров и среди них была отобрана модель, которая показала наилучшие результаты intfloat/multilingual-e5-large [8]. Эта нейронная сеть типа трансформер имеет 24 слоя с 600 миллионами параметров, и преобразует текст в вектор размера 1024 вещественных числа. Для генерации датасета использовалась большая языковая модель T-Lite-1.0 с 7 млрд. параметров [5]. Эксперименты проводились на NVIDIA GeForce RTX 4070 с 12 ГБ видеопамяти. В качестве метрики использовался нормализованный дисконтированный кумулятивный выигрыш (NDCG@5), который оценивает насколько правильный ответ имеет более высокое сходство с вопросом относительно других ответов. Без тонкой настройки качество составило 78.8%, после тонкой настройки качество составило 83.7%, в среднем качество векторного поиска увеличивается на 3 – 6%.

В ходе экспериментов было установлено, что дообучение моделей эмбеддинга улучшает качество работы систем информационного поиска (RAG) для специфичных предметных областей на несколько процентов. Для воспроизведения данной работы нет необходимости использовать сторонние ИИ сервисы, достаточно иметь возможность запустить небольшую локальную LLM, для чего достаточно персонального компьютера с графическим ускорителем. Благодаря этому подобную систему можно использовать для навигации по базам данных и документам закрытого предприятия, без рисков утечки информации.

Список литературы:

1. Маннинг, К. Введение в информационный поиск / К. Маннинг, П. Рагхаван, Х. Шютце. — М.: Вильямс, 2011. — 528 с.
2. Большакова, Е. И. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика / Е. И. Большакова, К. В. Воронцов и др. — М.: МИЭМ, 2011. — 272 с.
3. Николенко, С. И. Глубокое обучение / С. И. Николенко, А. А. Кадурин, Е. В. Архангельская. — СПб.: Питер, 2018. — 480 с.
4. Wang, L. Text Embeddings by Weakly-Supervised Contrastive Pre-training / L. Wang et al. // arXiv preprint arXiv:2212.03533. — 2022.
5. T-Bank AI Research. T-Lite: открытая LLM для бизнеса [Электронный ресурс]. — 2024. — URL: https://huggingface.co/t-bank-ai/t-lite-it-1.0 (дата обращения: 03.01.2026).
6. Wang, K. GPL: Generative Pseudo Labeling for Unsupervised Domain Adaptation of Dense Retrieval / K. Wang et al. // Proceedings of the 2022 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. — 2022. — P. 2345–2360.
7. Reimers, N. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks / N. Reimers, I. Gurevych // Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. — 2019. — P. 3982–3992.
8. Intfloat. Multilingual-E5-large: Model Card [Электронный ресурс] // Hugging Face. — 2024. — Режим доступа: https://huggingface.co/intfloat/multilingual-e5-large (дата обращения: 15.01.2026)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОДНОМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ УПРУГОПЛАСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СХЕМЫ КАБАРЕ

Гайворонская Ю.Е., Дерюгин Ю.Н.

Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Сарове, г. Саров

В работе исследуется применение разностной схемы КАБАРЕ [1] к численному решению одномерных нестационарных задач динамики упруго-пластической среды в лагранжевой постановке. Актуальность рассматриваемой проблематики обусловлена необходимостью адекватного моделирования быстропротекающих процессов деформирования твёрдых тел при интенсивных динамических воздействиях. Для таких процессов характерны резкие пространственные градиенты искомых величин, образование ударных волн, волн разгрузки, контактных границ, а также областей пластического течения. Это предъявляет повышенные требования к численным методам, в частности к их устойчивости, монотонности и способности разрешать разрывы без чрезмерной численной диссипации.

В качестве модельной задачи рассматривается соударение двух алюминиевых пластин, одна из которых движется с заданной скоростью, а другая первоначально покоится. Задача формулируется в одномерной лагранжевой постановке, в рамках которой все параметры рассматриваются как функции материальной координаты и времени. В качестве лагранжевой координаты используется массовая переменная

$$m = \int_{x_0}^{x} \rho \, dx,$$

что позволяет отслеживать движение материальных частиц среды и корректно учитывать деформационные процессы.

Математическая постановка включает систему одномерных нестационарных уравнений сохранения массы, импульса и энергии, записанных в лагранжевой форме, дополненную определяющими соотношениями упруго-пластической среды. Вектор основных неизвестных включает удельный объём $V = 1/\rho$, скорость u, внутреннюю энергию e, давление P и продольную компоненту девиатора напряжений τ_x. Замыкание системы осуществляется с использованием уравнения состояния и условия текучести, что обеспечивает корректное описание как упругой стадии деформирования, так и перехода материала в пластическое состояние [2].

Начальные условия формулируются в виде задачи распада разрыва. Расчётная область $x \in [0; 5]$ разбивается на две части, соответствующие двум пластинам: левая область соответствует движущейся пластине со скоростью $u_0 = 0.8$, правая — покоящейся. В частности, в момент времени $t = 0$ плотность и внутренняя энергия принимаются одинаковыми в обеих областях. Разрыв расположен в точке $x = L_1 = 1$. В пределах каждой области физические параметры принимают постоянные значения.

В начальный момент времени распределение основных величин задаётся следующим образом:

$$u(x,0) = \begin{cases} u_0 & ,0 \le x \le L_1 \\ 0 & ,L_1 < x \le 5 \end{cases}, \rho(x,0) = \begin{cases} 2.71 & ,0 \le x \le L_1 \\ 2.71 & ,L_1 < x \le 5 \end{cases},$$

$$e(x,0) = \begin{cases} 0 & ,0 \le x \le L_1 \\ 0 & ,L_1 < x \le 5 \end{cases}, P(x,0) = \begin{cases} 0 & ,0 \le x \le L_1 \\ 0 & ,L_1 < x \le 5 \end{cases}.$$

В лагранжевых переменных система уравнений, описывающая динамику среды, имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V}{\partial t} - \dfrac{\partial u}{\partial m} = 0, \\ \dfrac{\partial u}{\partial t} + \dfrac{\partial P}{\partial m} - \dfrac{\partial \tau_x}{\partial m} = 0, \\ \dfrac{\partial e}{\partial t} + (P - \tau_x)\dfrac{\partial u}{\partial m} = 0, \\ \dfrac{\partial \tau_x}{\partial t} - \dfrac{4\mu}{3V}\dfrac{\partial u}{\partial m} = 0. \end{cases}$$

Для замыкания системы используется уравнение состояния:

$$P = (\gamma - 1)\rho e + \frac{\rho_0 c_0^2}{n}\left(\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n - 1\right),$$

а полная энергия определяется как

$$E = e + \frac{u^2}{2}.$$

Дальнейший анализ системы уравнений требует явного представления производной давления по массовой лагранжевой координате. Поскольку в рассматриваемой модели

определяется уравнением состояния и зависит от внутренней энергии и удельного объёма, то есть $P = (e, V)$, его производная по координате m вычисляется с использованием правила цепочки:

$$\frac{\partial P}{\partial m} = \frac{\partial P}{\partial e}\frac{\partial e}{\partial m} + \frac{\partial P}{\partial V}\frac{\partial V}{\partial m}.$$

В результате дифференцирования получаем:

$$\frac{\partial P}{\partial m} = \frac{\gamma-1}{V}\frac{\partial e}{\partial m} - \left(\frac{(\gamma-1)e}{V^2} + \frac{c_0^2}{\rho_0^{n-1}}\right)\frac{\partial V}{\partial m}.$$

Данное выражение наглядно демонстрирует вклад двух физических механизмов: первый член отвечает за изменение давления вследствие изменения внутренней энергии, тогда как второй член описывает влияние сжимаемости среды.

Для удобства дальнейшего анализа и записи уравнений введём обозначения:

$$G = \frac{\partial P}{\partial e},\ K = \frac{\partial P}{\partial V}.$$

Тогда производная давления может быть записана в компактной форме:

$$\frac{\partial P}{\partial m} = G\frac{\partial e}{\partial m} + K\frac{\partial V}{\partial m}.$$

Дальнейший анализ системы уравнений удобно проводить, используя уже введённые обозначения для производных давления. С учётом этого система уравнений в лагранжевой координате может быть переписана в следующем виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V}{\partial t} - \dfrac{\partial u}{\partial m} = 0, \\ \dfrac{\partial u}{\partial t} + G\dfrac{\partial e}{\partial m} + K\dfrac{\partial V}{\partial m} - \dfrac{\partial \tau_x}{\partial m} = 0, \\ \dfrac{\partial e}{\partial t} + (P - \tau_x)\dfrac{\partial u}{\partial m} = 0, \\ \dfrac{\partial \tau_x}{\partial t} - \dfrac{4\mu}{3V}\dfrac{\partial u}{\partial m} = 0. \end{cases}$$

Для применения характеристического анализа и построения численной схемы данную систему удобно привести к квазилинейному виду. В этом случае она записывается в компактной матричной форме:

$$\frac{\partial \vec{\eta}}{\partial t} + A\frac{\partial \vec{\eta}}{x} = 0,$$

где вектор неизвестных имеет вид:

$$\vec{\eta} = \begin{bmatrix} V \\ u \\ e \\ \tau_x \end{bmatrix}.$$

Матрица A определяется коэффициентами системы и имеет следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ K & 0 & G & -1 \\ 0 & P - \tau_x & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4\mu}{3V} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Приведение системы к квазилинейной форме позволяет исследовать её волновые свойства, в частности определить скорости распространения возмущений и соответствующие им характеристики.

Для этого вычисляются собственные значения и левые векторы матрицы A. Собственные значения имеют вид:

$$\lambda_1 = \mathrm{c},\ \lambda_2 = -\mathrm{c},\ \lambda_3 = 0,\ \lambda_4 = 0,$$

где величина

$$c = \sqrt{G(P - \tau_x) - K + \frac{4\mu}{3V}}.$$

имеет смысл обобщённой скорости распространения возмущений в среде с учётом как термодинамических, так и упругих свойств материала.

Соответствующие левые собственные векторы имеют вид:

$l_1 = [-K \quad c \quad -G \quad 1]$, $l_2 = [-K \quad -c \quad -G \quad 1]$, $l_3 = [-K \quad 0 \quad -G \quad 1]$, $l_4 = \left[-\frac{4\mu}{3V} \quad 0 \quad 0 \quad 1\right]$.

Использование собственных векторов позволяет перейти к характеристическим переменным, в которых система распадается на набор независимых уравнений переноса. На основе найденных собственных векторов вводятся локальные инварианты Римана, представляющие собой линейные комбинации исходных переменных, сохраняющиеся вдоль соответствующих характеристик. Они имеют вид:

$I_1 = -[K]V + [c]u - [G]e + \tau_x, \quad I_2 = -[K]V - [c]u - [G]e + \tau_x, \quad I_3 = -[K]V - [G]e + \tau_x,$
$I_4 = -\left[\frac{4\mu}{3V}\right]V + \tau_x.$

Численное решение рассматриваемой системы уравнений осуществляется с использованием балансно-характеристической схемы КАБАРЕ, которая реализуется в виде трёх последовательных этапов: предиктора, генерация потоков (экстраполяции и нелинейной коррекции) и корректора.

На первом этапе вычисляются промежуточные значения искомых величин на полушаге по времени. Данный этап основан на прямой аппроксимации исходной системы уравнений в лагранжевых координатах с использованием центральных разностей.

Для удельного объёма имеем:

$$\frac{V_{j+1/2}^{n+1/2} - V_{j+1/2}^{n}}{\Delta t/2} = \frac{u_{j+1}^{n} - u_{j}^{n}}{\Delta m}.$$

Аналогично для скорости:

$$\frac{u_{j+1/2}^{n+1/2} - u_{j+1/2}^{n}}{\Delta t/2} = -[G]_{j+1/2}^{n} \frac{e_{j+1}^{n} - e_{j}^{n}}{\Delta m} - [K]_{j+1/2}^{n} \frac{V_{j+1}^{n} - V_{j}^{n}}{\Delta m} + \frac{\tau_{x,j+1}^{n} - \tau_{x,j}^{n}}{\Delta m}.$$

Уравнение энергии записывается в виде:

$$\frac{e_{j+1/2}^{n+1/2} - e_{j+1/2}^{n}}{\Delta t/2} = -[P - \tau_x]_{j+1/2}^{n} \frac{u_{j+1}^{n} - u_{j}^{n}}{\Delta m}.$$

Для девиатора напряжений:

$$\frac{\tau_{x,j+1/2}^{n+1/2} - \tau_{x,j+1/2}^{n}}{\Delta t/2} = \left[\frac{4\mu}{3V}\right]_{j+1/2}^{n} \frac{u_{j+1}^{n} - u_{j}^{n}}{\Delta m}.$$

Таким образом, на этапе предиктора формируются промежуточные значения переменных, которые далее используются для построения характеристической структуры решения.

На следующем этапе производится переход к характеристическим переменным с использованием локальных инвариантов Римана. Эти инварианты вычисляются на основе значений переменных на полушаге по времени $n + 1/2$.

Далее выполняется линейная экстраполяция инвариантов влево и вправо от узла:

$$(I_k)_{j,L}^{n+1} = 2(I_k)_{j-1/2}^{n+1/2} - (I_k)_{j-1}^{n}, (I_k)_{j,R}^{n+1} = 2(I_k)_{j+1/2}^{n+1/2} - (I_k)_{j+1}^{n}.$$

Однако для обеспечения монотонности и предотвращения не физических осцилляций вводится процедура коррекции. Значения инвариантов ограничиваются в пределах локальных экстремумов:

$$(I_k)_{j,L}^{n+1} \in [min(I_k)_L, max(I_k)_L], (I_k)_{j,R}^{n+1} \in [min(I_k)_R, max(I_k)_R].$$

Данная процедура играет роль нелинейного ограничителя и обеспечивает устойчивость численного решения.

После коррекции инвариантов выполняется восстановление физических переменных. При этом используется направление распространения характеристик, определяемое знаками собственных значений λ_k.

В зависимости от знака характеристической скорости выбирается соответствующее (левое или правое) значение инварианта, которое влияет на решение в узле.

На основе выбранных инвариантов вычисляются новые значения переменных. В частности, скорость определяется как:

$$u^* = \frac{I_1 - I_2}{2c}.$$

Удельный объём вычисляется из соотношения:

$$V^* = \frac{I_1 + I_2 - 2Ge + 2\tau_x - 2KV}{2\left(K + \frac{4\mu}{3V}\right)}.$$

Далее определяются давление и напряжение:

$$P^* = I_3 - KV^*, \tau_x^* = I_4 + \frac{4\mu}{3V}V^*.$$

Внутренняя энергия восстанавливается аналогичным образом:

$$e^* = I_3 - KV^*.$$

Таким образом, на данном этапе осуществляется переход от характеристических переменных обратно к физическим, что позволяет получить потоковые значения на новом временном слое $n+1$.

На заключительном этапе производится уточнение решения на полном временном шаге. Для этого используется схема, аналогичная предиктору, но уже с использованием обновлённых значений переменных.

Для удельного объёма:

$$\frac{V_{j+1/2}^{n+1}-V_{j+1/2}^{n+1/2}}{\Delta t/2}=\frac{u_{j+1}^{n+1}-u_{j}^{n+1}}{\Delta m}.$$

Для скорости:

$$\frac{u_{j+1/2}^{n+1}-u_{j+1/2}^{n+1/2}}{\Delta t/2}=-[G]_{j+1/2}^{n+1/2}\frac{e_{j+1}^{n+1}-e_{j}^{n+1}}{\Delta m}-[K]_{j+1/2}^{n+1/2}\frac{V_{j+1}^{n+1}-V_{j}^{n+1}}{\Delta m}+\frac{\tau_{x,j+1}^{n+1}-\tau_{x,j}^{n+1}}{\Delta m}.$$

Для энергии:

$$\frac{e_{j+1/2}^{n+1}-e_{j+1/2}^{n+1/2}}{\Delta t/2}=-[P-\tau_x]_{j+1/2}^{n+1/2}\frac{u_{j+1}^{n+1}-u_{j}^{n+1}}{\Delta m}.$$

Для напряжений:

$$\frac{\tau_{x,j+1/2}^{n+1}-\tau_{x,j+1/2}^{n+1/2}}{\Delta t/2}=\left[\frac{4\mu}{3V}\right]_{j+1/2}^{n+1/2}\frac{u_{j+1}^{n+1}-u_{j}^{n+1}}{\Delta m}.$$

В результате выполнения корректирующего шага достигается согласованное обновление всех переменных на новом временном слое, что завершает один шаг схемы КАБАРЕ, которая обеспечивает второй порядок аппроксимации на гладких решениях и пониженный уровень численной диссипации по сравнению с традиционными разностными методами [3].

Список литературы:

1. Головизнин В. М., Зайцев М. А., Карабасов С. А. *Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов.* — М.: Изд-во МГУ, 2013. — 192 с.

2. Wilkins M. L. Calculation of elastic-plastic flow // *Methods in Computational Physics*. — 1964. — Vol. 3. — P. 211 - 263.

3. Головизнин В. М., Самарский А. А. Некоторые свойства разностной схемы «Кабаре» // *Математическое моделирование*. — 1998. — Т. 10, № 1. — С. 101 - 116.

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА ОПЕРАЦИИ «ВЫТЯГИВАНИЕ» В САПР «САРУС» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ 3D-ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Рыжов С.А.[1,2], Маврин С.В.[1,2], Сироткин Д.А.[2], Уразов А.В.[2]

[1]Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

[2] ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Операция «вытягивание» является базовым инструментом современных систем автоматизированного проектирования (САПР), обеспечивающим получение трёхмерной геометрии на основе двумерных эскизов. В рамках повышения удобства работы и оптимизации процесса моделирования в отечественной САПР «Сарус» [1] команда аналитиков Института цифровых технологий (ИЦТ) инициировала обновление механизма данной операции, ориентированное на сокращение времени построения 3D-моделей.

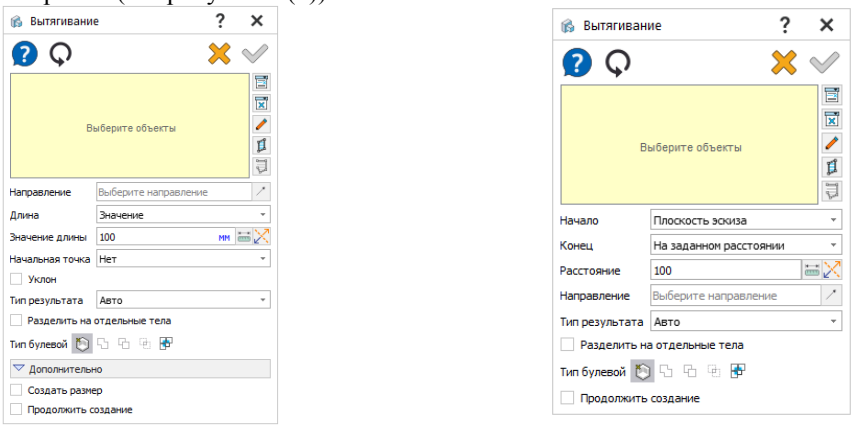
В действующей версии системы параметры вытягивания определяются через поля «длина» и «начальная точка», что делает интерфейс менее интуитивным и усложняет выполнение стандартных проектных операций. Дополнительной проблемой является то, что изменение режима вытягивания для уже сформированного тела нередко приводит к критическим ошибкам, оказывая негативное влияние на стабильность программного комплекса.

Предлагаемая модификация включает не только переработку диалогового окна команды «вытягивание» с устранением указанных проблем, но и расширение набора доступных режимов работы операции. Новые режимы предусматривают автоматическое формирование управляющих размеров вытягиваемого объекта – функциональность, ранее

отсутствовавшую в «Сарус». Ожидается, что такие изменения повысят стабильность, расширят возможности проектирования и улучшат удобство взаимодействия пользователя с системой.

Постановка задачи

Основная задача модификации команды была декомпозирована на 15 отдельных задач, каждая из которых описывает конкретный режим операции вытягивание. В текущей версии программного обеспечения «Сарус» диалоговое окно команды вытягивание выглядит следующим образом (см. рисунок 1 (б)).



(а) (б)

Рис 1. Диалоговые окна операции «Вытягивание» в САПР «Сарус».
а – исходное окно, б – обновлённое окно

Смена режимов вытягивания происходит по выбранным значениям в полях параметров «Длина» и «Начальная точка». В требованиях к реализации нового диалогового окна, было предложено реализовать новые параметры вытягивания: «Начало» и «Конец», что соответствует режимам начала и конца вытягивания соответственно (см. рисунок 1 (а)). В параметрах начала вытягивания будет 3 режима: «Плоскость эскиза», «Объект» и «Смещение». Режим «Плоскость эскиза» подразумевает собой обычное вытягивание из контура эскиза, без дополнительных операций. В режиме «Объект», под объектом понимается: точка, система координат (СК), вершина, грань, рабочая плоскость, 2D узел, поверхность или плоскость. Режим «Смещение» подразумевает новый параметр отступа от контура эскиза. В параметрах конца вытягивания будет 5 режимов: «На заданном расстоянии», «Объект», «Симметрия», «На расстоянии от объекта» и «Через всё».

Обновлённый интерфейс диалогового окна является более интуитивно понятным для пользователя. Также было принято решение убрать раздел «Дополнительно» с чекбоксом «Создать размер», так как управляющий размер в дальнейшем будет создаваться автоматически, но будет скрыт от пользователя на сцене. Показать/скрыть управляющие размеры можно будет через навигатор модели текущего документа.

Реализация новых режимов вытягивания

В текущей реализации отсутствуют механизмы построения вытягивания от объекта с симметрией, от объекта через всё, со смещение и с симметрией, и со смещение через всё. Данные механизмы были реализованы для данных четырёх режимов.

Рассмотрим пример вытягивания от объекта с симметрией (см. рисунок 2). На данном рисунке контуром вытягивания является окружность, а в параметре «Значение» выбран объект точки в 3D. Относительно данного объекта симметрично будет построено вытягивание на 25 значений влево и вправо соответственно. Длину симметрии можно изменять с помощью манипуляторов на сцене (манипулятор точки и стрелки) или с помощью числового значения в диалоговом окне. Также после того, как тело вытягивания будет создано, длину симметрии вытягивания можно будет изменять с помощью соответствующего управляющего размера.

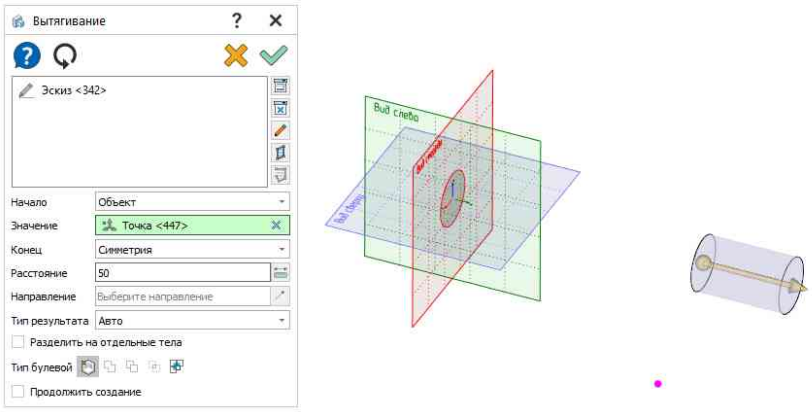


Рис. 2. Вытягивание от объекта с симметрией

При реализации вытягивания от объекта через всё были обнаружены некоторые трудности в реализации. Основная проблема заключалась с булевыми операциями, а именно с выбором операнда. В текущей реализации можно выбрать только одно целевое тело, над которым будет преобразована булева операция. В будущем планируется расширить данный функционал, чтобы программный генератор мог взаимодействовать с несколькими операндами одновременно, а пока было принято решение убирать возможность выбора булевой операции и активировать режим булевой «Нет», если на сцене находится более 1 твёрдого тела, при этом вытягивания будет строиться по самому последнему телу по направлению вытягивания (см. рисунок 3). Также, в новой реализации режима через всё появилась кнопка обратного направления. Управляющий размер в данном режиме не создаётся.

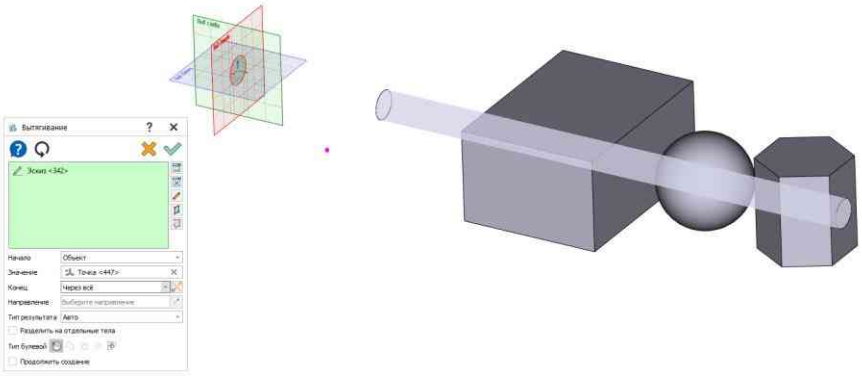


Рис. 3. Вытягивание от объекта через всё. Режим булевой выключен

Рассмотрим режим начала вытягивания со смещением. Как говорилось ранее, контур вытягивания будет сдвинут на заданной расстояние относительно начала. Данное смещение, как и само вытягивание можно инвертировать по направлению. Также при данном режиме у нас будет создаваться 2 управляющих размера: первый для размера смещения, второй для расстояния вытягивания (в данном случаем длина симметрии). Также реализованы два манипулятора для управления данными параметрами со сцены. На рисунке 4 изображён пример вытягивания со смещением и с симметрией. Слева изображён фантом вытягивание без смещения, а справа со смещением, равным 50.

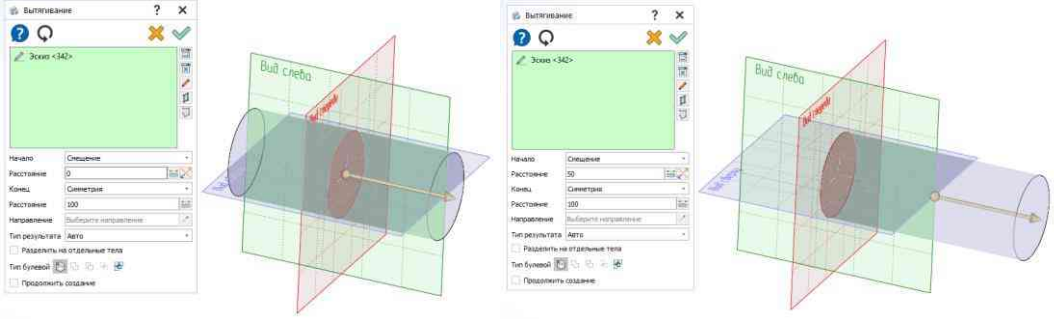


Рис. 4. Вытягивание со смещением 0 и 50 соответственно с режимом конца по симметрии

Последний режим вытягивания, который требовалось реализовать, это режим вытягивания со смещением через всё. Данный режим похож по функционалу как вытягивание от объекта через всё, только здесь начала вытягивания мы регулируем отступом (см. рисунок 5). В данном режиме также создаётся управляющий размер для смещения.

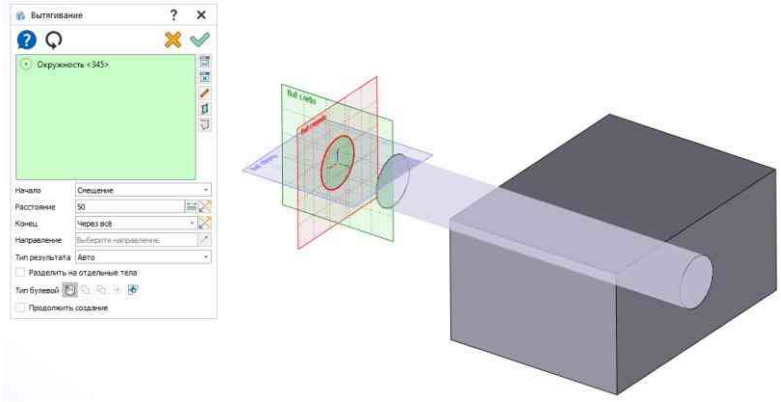


Рис. 5. Вытягивание со смещением, равным 50 и режим конца вытягивания через всё

На рисунке 6 изображён пример вытягивания со смещением через всё с применением булевой операции вычитания на единственный твердотельный объект на сцене.

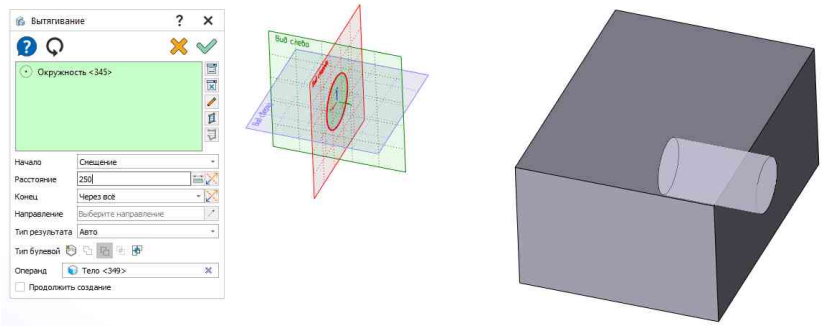


Рис. 6. Вытягивание со смещением, равным 250 и режим конца вытягивания через всё с применением булевой операции вычитания

Таким образом были реализованы новые режимы вытягивания, которые значительно расширяют возможности команды «Вытягивание». Старые режимы были подстроены под новые параметры контролов «Начало» и «Конец» соответственно.

Реализация новых управляющих размеров

Помимо управляющего размера длины вытягивания, при режиме смещения от начала вытягивания будет реализован новый размер, отвечающий за смещение (см. рисунок 7).

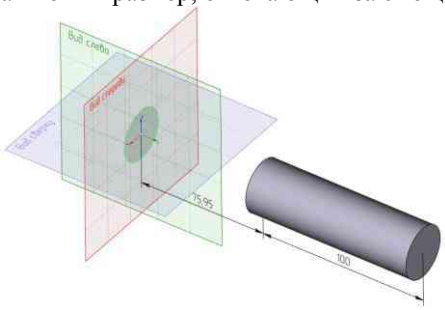


Рис. 7. Два управляющих размера вытягивания со смещением 75.95 на заданном расстоянии, равном 100

Для симметричного вытягивания со смещением, линии выноса размера будут направлены в разные стороны (см. рисунок 8) для более удобного визуального расположения, чтобы размеры не наслаивались друг на друга.

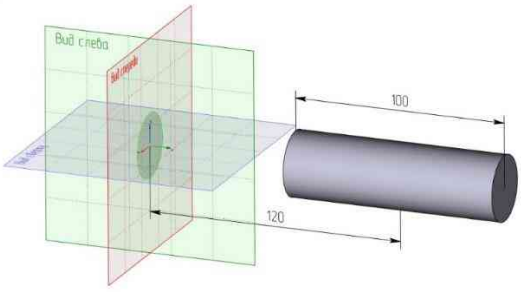


Рис. 8. Два управляющих размера вытягивания с симметричным вытягиванием 100 и смещением 120

Кроме управляющего размера смещения, в будущем планируется реализация для управляющего размера уклона вытягивания.

Выводы и заключение

В результате проделанной работы был выполнен рефакторинг операции «Вытягивание» в САПР «Сарус», а именно модифицировано диалоговое окно команды, реализованы новые комбинированные режимы начала с помощью параметров «Начало» и «Конец», устранены множество критических и визуальных ошибок, связанных с манипуляторами вытягивания, а также были реализованы новые управляющие размеры для данной операции.

Список литературы:

1. Отечественная система полного жизненного цикла «Сарус» обеспечит импортонезависимость и безопасность. //САПР и графика, №12, 2023, с. 68-71.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЛАДКОГО СОПРЯЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЗОР МЕТОДОВ)

Космачева К.Д.[1], Старкова А.С.[2], Уразов А.В.[2], Маврин С.В.[3]

[1]*Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Саров*

[2]*ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИЭФ», г. Саров*

[3]*Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров*

Введение

Современный уровень развития промышленности характеризуется непрерывным, а точнее постоянно ускоряющимся совершенствованием техники и информационных технологий. При разработке новых технических устройств и во многих информационных системах используются сложные геометрические построения. В технических устройствах сложные поверхности используются при проектировании таких систем как аэродинамические поверхности летательных аппаратов, корпуса судов, лопатки турбин, гребные винты, кузова автомобилей и поверхности произвольной формы (скульптурные поверхности) и т.д. В информационных системах сложные геометрические построения применяются при визуализации и анимации практически любых объектов.

В настоящее время в *САПР* (Системы Автоматизированного Проектирования) сложные геометрические построения выполняются с помощью программного комплекса, называемого «Геометрическое ядро», в котором реализованы разнообразные математические методы геометрических преобразований и построений. Одной из обязательных функциональных возможностей геометрического ядра является сопряжение (гладкое соединение) поверхностей.

В современных *CAD*-системах («КОМПАС», «T-FLEX», «NX») гладкое сопряжение реализовано с геометрической непрерывностью порядка G0-G2/G3 [1,2,3]. Сопряжение с геометрической непрерывностью не является математически строгим понятием непрерывности, вследствие чего становится невозможным объединить два и более сопряженных с геометрической непрерывностью объекта в один. Объединение нескольких объектов в один является обязательным требованием к *CAD*-системам, так называемого тяжелого класса, которые в настоящее время активно создаются.

Таким образом, разработка математических методов и алгоритмов гладкого сопряжения поверхностей с параметрической непрерывностью является актуальной задачей.

Настоящая работа базируется на постанове задачи работы [4] и является дальнейшим развитием этой работы.

Новизна работы состоит в формулировке задачи гладкого сопряжения поверхностей, представленных в виде тензорного произведения двух кривых Безье, и в анализе математических методов построения сопряжения поверхностей Безье.

Геометрическая и параметричеческая непрерывность

В *CAD*-системах различают геометрическую и параметрическую непрерывность [5, 6]. Как известно [5,6], при параметрическом представлении кривых производные являются векторами. Геометрическая непрерывность означает, что в точке сопряжения кривых векторы производных совпадают по направлению, но не совпадают по длине. Параметрическая непрерывность означает, что в точке сопряжения кривых векторы производных совпадают как по направлению, так и по длине. В соответствии с терминологией классической монографии [6] непрерывность n-го порядка обозначают: геометрическую – G^n, параметрическую – C^n. Пример выполнения геометрической непрерывности, но не выполнения параметрической непрерывности приводится на рис. 1.

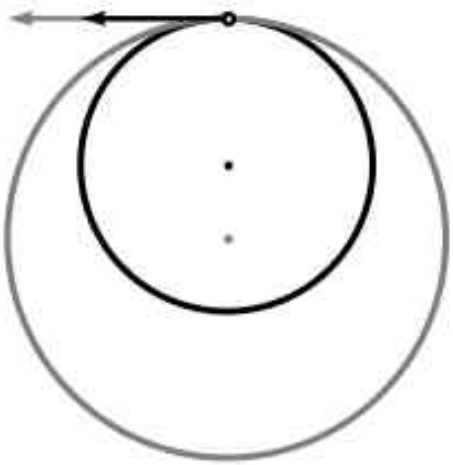


Рис. 1. Пример выполнения геометрической непрерывности, но не выполнения параметрической непрерывности для окружностей разного радиуса

Определение 1. Кривые $P(u)$ и $Q(v)$ гладко сопряжены с порядком гладкости r в точке сопряжения, если для сопрягаемых параметрических функций в точке сопряжения выполняется равенство производных порядка r

$$P^{(r)}(u)|_{u=1} = Q^{(r)}(v)|_{v=0}, \quad r = \overline{0,n}, \qquad (1)$$

где r – порядок производной (нулевая производная ($r = 0$) соответствует значению функции).

В настоящей работе термины гладкость сопряжения кривых $P(u)$ и $Q(v)$ порядка r в точке сопряжения и непрерывность C^r в точке сопряжения понимаются эквивалентными.

Пример гладко сопряженных двух кривых Безье 3-ей степени приводится на рис. 2.

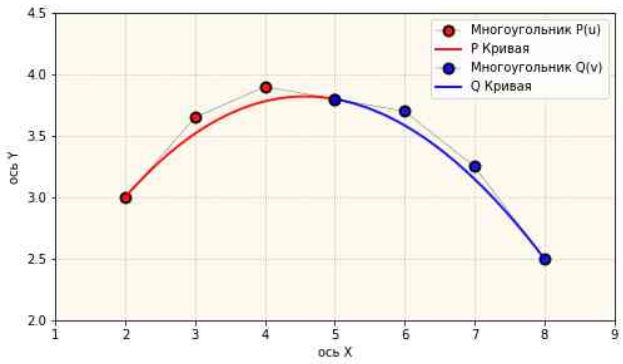


Рис.2. Пример гладко сопряженных кривых Безье

Безье поверхности

Поверхность Безье является дальнейшим обобщением понятия кривой Безье, поэтому дадим определение кривой Безье.

Кривая Безье степени n задается параметрическим уравнением [6]:

$$B(t) = \sum_{i=0}^{n} B_i^n(t) P_i,\ t \in [0,1] \qquad (2)$$

где $B_i^n(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$ — базисные полиномы Бернштейна, а P_i — контрольные точки (полюсы).

В настоящей работе, как и работах [4,7] для построения кривых Безье будем использовать базисные функции B-сплайнов, которые рассчитываются по алгоритму Кокса-де-Бура [7]. Использование базисных функций Кокса-де-Бура в отличие от базиса полиномов Бернштейна позволяет за одно обращение к соответствующей программной функции получить как сами функции Кокса-де-Бура, так и все их производные, что делает расчет производных любых порядков тривиальным. Запись кривой Безье с использованием базисных функций Кокса-де-Бура выглядит следующим образом:

$$B(t) = \sum_{i=0}^{n} N_i^n(t) P_i,\ t \in [0,1] \qquad (3)$$

где N_i^n — i-я базисная функция Кокса-де-Бура степени n, а P_i — контрольные точки (полюсы).

В [6] показано, что представление кривых Безье в виде (2) и в виде (3) полностью эквиваленты, то есть совпадают как геометрически, так и параметрически.

Поверхность Безье это тензорное произведение, представляющее собой двумерное расширение кривой Безье. Поверхность строится путем перемножения базисных функций для каждого из параметров (u, v) и координат соответствующей контрольной точки:

$$P(u,v) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} N_i^n(u)\, N_j^m(v) P_{i,j},\quad u,v \in [0,1] \qquad (4)$$

где $P(u,v)$ – поверхность Безье степени $(n \times m)$ ($P(u,v)$ координаты поверхности, для заданных u, v); $u, v \in [0,1]$ – параметрические переменные; N_i^n, N_j^m – i-я и -я базисные функции степени n и m, соответственно; $P_{i,j}$ – контрольные точки (контрольная сетка).

У поверхности Безье можно определить контрольную кривую, которая будет использоваться при сопряжении поверхностей Безье.

Определение 2. Контрольной кривой будем называть контрольные точки сетки кривой Безье, который образуют контрольные точки для линии, вдоль которой выполняется сопряжение.

На рис. 3 и 4 приведен пример контрольных сеток для поверхностей Безье:

$$P(u,v) = \sum_{i=0}^{2} \sum_{j=0}^{3} N_i^3(u) N_j^2(v) P_{i,j} \qquad (6)$$

$$Q(u,v) = \sum_{i=0}^{2} \sum_{j=0}^{3} N_i^3(u) N_j^2(v) Q_{i,j} \qquad (7)$$

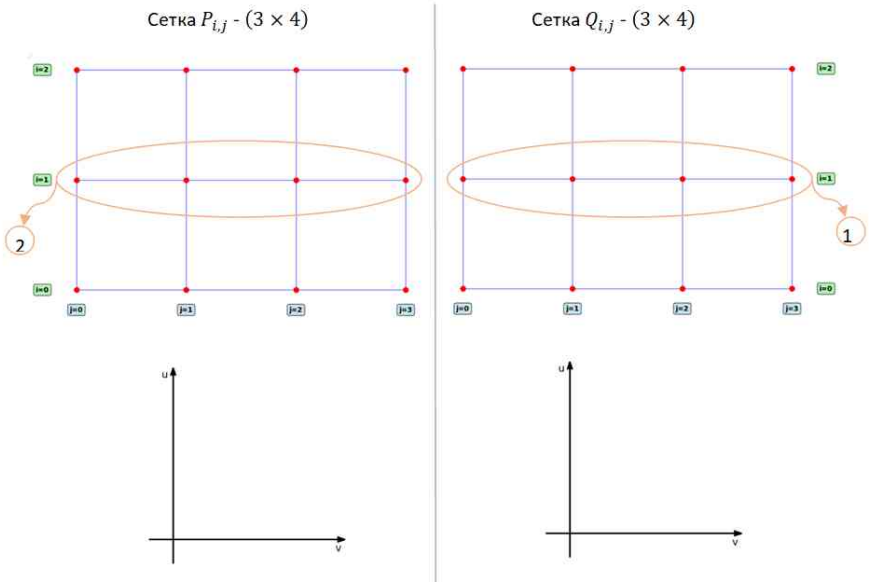


Рис.3 Контрольные сетки (2D вид)

Для примера, приведенного на рис. 3 контрольная кривая, образованная контрольными точками 1 записывается следующим образом:

$$LQ_1(v) = \sum_{j=0}^{3} N_j^3(v) Q_{1,j}, \qquad (8)$$

Контрольная кривая, образованная контрольными точками 2, записывается следующим образом:

$$LP_1(v) = \sum_{j=0}^{3} N_j^3(v) P_{1,j} \qquad (9).$$

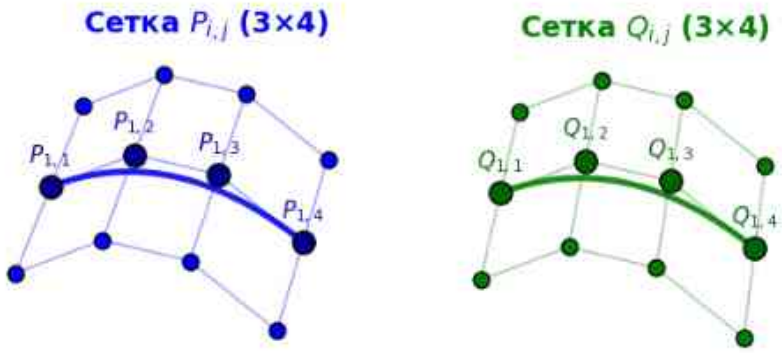


Рис.4 Контрольные сетки (3D вид)

Математическая постановка задачи гладкого сопряжения двух поверхностей Безье

Даны две поверхности Безье $P(u,v)$ и $Q(t,s)$, степени поверхностей совпадают и равны $(n \times m)$. Необходимо построить промежуточную поверхность $R(l,w)$ степени $(n \times k)$, которая соединяет поверхности $P(u,v)$ и $Q(t,s)$ и при этом в точке касания (точке сопряжения) для контрольных линий должно выполняться условие гладкого сопряжения в соответствии с определением 1.

Так как по первой параметрической переменной (то есть по переменной u для поверхности $P(u,v)$, переменной t для поверхности $Q(t,s)$ и переменной l для поверхности $R(l,w)$) степень контрольных кривых одна и та же и равна n, то это приводит тому, что количество контрольных кривых по вторым параметрическим переменным (v для $P(u,v)$, s для $Q(t,s)$, w для $R(l,w)$) у всех трех поверхностей одинаково и равно $(n+1)$. Для примера на рис.5 приведены исходные поверхности $P(u,v)$ и $Q(t,s)$ степени (2×3) и сопрягающая (соединительная) поверхность $R(l,w)$ степени (2×6).

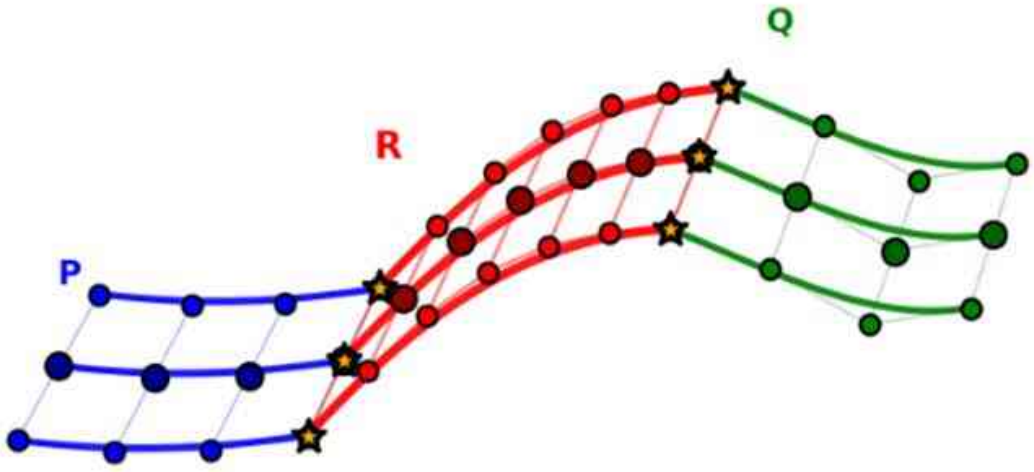


Рис. 5 Исходные поверхности $P(u,v)$ и $Q(t,s)$ степени (2×3) и сопрягающая (соединительная) поверхность $R(l,w)$ степени (2×6).

Все три поверхности по второй параметрической переменной имеют три контрольных кривых. Для поверхностей $P(u,v)$ и $Q(t,s)$ это кривые Безье 3-й степени, для поверхности $R(l,w)$ это кривые 6-й степени.

Метод решения

Для построения сопрягающей (соединительной) поверхности $R(l,w)$ необходимо в соответствии с определением 1 выполнение всех контрольных кривых «вдоль» вторых параметрических переменных.

По линии сопряжений поверхностей $P(u,v)$ и $R(l,w)$ сопряжение контрольных кривых выглядит следующим образом:

$$LP_i^{(r)}(v)|_{v=1} = LR_i^{(r)}(w)|_{w=0}, \quad r = \overline{0,m}, \quad i = \overline{0,n} \qquad (10)$$

По линии сопряжений поверхностей $R(l,w)$ и $Q(t,s)$ сопряжение контрольных кривых выглядит следующим образом:

$$LR_i^{(r)}(w)|_{w=1} = LQ_i^{(r)}(s)|_{s=0}, \quad r = \overline{0,m}, \quad i = \overline{0,n} \qquad (11)$$

Распишем для примера первые три равенства (нулевая, первая и вторая производные) для первых контрольных кривых (то есть для i =0) для равенства (10)

$$R_0 N_0^{k\,(0)}(0) = P_m N_m^{m\,(0)}(1), \qquad (12)$$

$$R_0 N_0^{k\,(1)}(0) + R_1 N_1^{k\,(1)}(0) = P_m N_m^{m\,(1)}(1) + P_{m-1} N_{m-1}^{m\,(1)}(1), \qquad (13)$$

$$R_0 N_0^{k\,(2)}(0) + R_1 N_1^{k\,(2)}(0) + R_2 N_2^{k\,(2)}(0) = \\ = P_m N_m^{m\,(2)}(1) + P_{m-1} N_{m-1}^{m\,(2)}(1) + P_{m-1} N_{m-2}^{m\,(2)}(1), \qquad (14)$$

где верхний индекс в скобках у базисных функций означает порядок производной базисной функции.

Выполнив по аналогии с (12)-(14) запись равенств до n-й производной получим систему линейных уравнений, решив которую получим первых m точек первой контрольной кривой поверхности $R(l,w)$, Записав равенства (10) для следующих контрольных кривых (то ест для 2-й, 3-й и т.д.) и решив соответствующие системы линейных уравнений, получим первые $(n \times m)$ контрольные точки поверхности $R(l,w)$. Выполнив аналогичные действия для выражения (11), получим необходимые точки для полного определения поверхности $R(l,w)$.

Заключение

В работе рассмотрена задача гладкого сопряжения поверхностей Безье, которая сводится к решению нескольких систем линейных уравнений.

Список литературы:

1. Условия сопряжения кривых и поверхностей. КОМПАС-3D v21. https://help.ascon.ru/KOMPAS/21/ru-RU/1036_111_5_uslov_sopr_kriv_pov.html
2. Сглаживающая и Аппроксимирующая поверхность. T-FLEX CAD 18 и приложения. Новые возможности. https://www.tflex.ru/downloads/V18/T-FLEX%20CAD%2018%20Release%20Notes.pdf#page=98.08.
3. Мостики. Урок 12. NX. https://rutube.ru/video/b6a94c9e20903a9ca2e2e5681ef1b5b4/?playlist=588660.
4. Кривошеев О. В., Маврин С. В., Старкова А. С. Сопряжение кривых Безье для задач гладкого соединения кривых и скругления углов //Омский научный вестник. – 2025. – №. 2 (194). – С. 26-34. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-26-34
5. Ameer M. Generalized Bézier-like model and its applications to curve and surface modeling / M. Ameer, M. Abbas, M. Shafiq [et al.] // PloS ONE. – 2024. – Vol. 19. – No. 6. – P. e0303340. – DOI: 10.1371/journal.pone.0303340.
6. Piegl L. The NURBS book / L. Piegl, W. Tiller. – 2. ed. – Springer, 1997. – 646 p. – ISBN 978-3-540-61545-3.
7. Ганчук С. Н., Старкова А. С., Кривошеев О. В., Маврин С. В., Рыжов С. А. Полностью гладкая аппроксимация произвольного набора кривых Безье. Часть 1: Кривые Безье и постановка задачи // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2024. Т. 21, № 11. С. 3 – 8. DOI: 10.14489/vkit.2024.11.pp.003-008.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЛАДКОГО СОПРЯЖЕНИЯ *B*-СПЛАЙНОВ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЗОР МЕТОДОВ)

Шабалин М.С.[1], Ганчук С.Н.[2], Маврин С.В.[3]
[1]*Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Саров*
[2]*ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИЭФ», г. Саров*
[3]*Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров*

Введение

Проектирование современных технических объектов невозможно представить без использования *CAD*-систем (систем автоматизированного проектирования). Это связано с тем, что конструкция современных технических устройств постоянно усложняется, и для их создания требуются точные цифровые модели. Одним из основных геометрических элементов цифровых моделей является *B*-сплайн.

Одной из ключевых задач при создании таких моделей является гладкое сопряжение (соединение) линий и поверхностей. Важно, чтобы в точках сопряжения (стыковки) кривые переходили друг в друга плавно, без изломов, в соответствии с заданными требованиями к гладкости. В инженерной практике такие задачи возникают при проектировании:

- **Авиационной и морской техники:** создание обтекаемых поверхностей самолетов и корпусов кораблей.
- **Газотурбинных двигателей:** поверхность лопатки турбины, которая чаще всего не имеет аналитического описания должна обладать высоким порядком гладкости (непрерывности);
- **Автомобилестроения:** разработка внешних панелей кузова, где важна не только аэродинамика, но и эстетичный вид бликов.
- **Транспортного строительства:** расчет трасс автомобильных дорог;
- **Траектории движения беспилотных систем:** гладкость траектории позволяет обеспечить движение более стабильным и предсказуемым.

Актуальность работы состоит в том, что задача построения геометрического сопряжения с высоким порядком гладкости (класса C^n) с математической точки зрения обладает существенной сложностью [1,2]. В классических учебных пособиях и монографиях по интерполяции и аппроксимации сплайновыми функциями [3–5] данный класс задач не рассматривается. Вместе с тем, проблемам конструирования сопряжений кривых и поверхностей с невысоким порядком гладкости (до C^2) в современной отечественной и зарубежной научной литературе посвящено достаточное количество исследований [6-9]. В то же время работы по гладкому сопряжению *B*-сплайнов с максимально возможным порядком параметрической гладкости, то есть C^n, где $n = (p-1)$, p – степень сплайна в настоящее время отсутствуют. Сопряжение с *B*-сплайнов максимально возможным порядком гладкости является необходимым условием, для преобразования двух сопряженных с максимально возможным порядком параметрической гладкости *B*-сплайнов в один *B*-сплайн, который определен на меньшем количестве контрольных точек. Эта задача (преобразования двух сплайнов в один) является составной частью проблемы построения больших поверхностей, таких как поверхность самолета и корпуса судна. Поэтому разработка математических методов гладкого сопряжения *B*-сплайнов является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является совершенствование геометрического ядра CAD-модуля системы управления полным жизненным циклом «Сарус» за счет разработки алгоритмов сопряжения *B*-сплайнов с максимально возможным порядком гладкости, который соответствует $(p-1)$, где p – степень сплайна.

Научная новизна работы состоит в новом математическом подходе к задаче сопряжения, основанном на постановке оптимизационной задачи при ограничениях в виде равенств. Оптимизационная постановка позволяет выполнить требования гладкого сопряжения и минимизировать отклонение сопряженных кривых от исходных.

Представление *B*-сплайнов и их производных

В настоящем разделе вводятся необходимые для дальнейшего изложения понятия и определения.

B-сплайн степени p это сплайновая функция, которую представим как сумму произведений координат контрольных точек на базисные функций [3-5]:

$$C(u) = \sum_{i=0}^{n} P_i N_{i,p}(u), \qquad n \geq p, \tag{1}$$

где u – параметрическая переменная, определенная на узловом векторе U, P_i – заданные контрольные точки, $N_{i,p}(u)$ – i-я базисная функция степени p, $i = \overline{0,n}$.

Производные B-сплайна (1) будем рассчитывать как производную суммы:

$$C^{(k)}(u) = \sum_{i=0}^{n} P_i N_{i,p}^{(k)}(u), \qquad n \geq p, \quad k = \overline{0,p} \tag{2}$$

где k – порядок производной (здесь и далее по тексту $k = 0$ – «нулевая производная», то есть значение функции).

Параметрическая переменная u в выражении (1) определена на узловом векторе U, который имеет следующий вид:

$$U = \{u_0, \dots, u_p, u_{p+1}, \dots, u_n, u_{n+1}, \dots, u_{n+p+1}\},$$
$$u_0 = u_1 = \cdots = u_p = a,$$
$$u_{n+1} = u_{n+2} = \cdots = u_{n+p+1} = b,$$
$$a < u_{p+1} \leq u_{p+2} \leq \cdots \leq u_n < b.$$

Базисные функции $N_{i,p}(u)$ вычисляются по рекуррентному алгоритму Кокса-де-Бура [3-5]. Алгоритм Кокса-де-Бура позволяет за одно обращение к соответствующей программной функции получить как сами значения базисных функций, так и значения всех их производных (то есть от $k = 0$ – «нулевой производной» до -й производной) в виде матрицы $D(u)$:

$$D(u) = \begin{bmatrix} N_0^{p^{(0)}}(u) & N_1^{p^{(0)}}(u) & \cdots & N_p^{p^{(0)}}(u) \\ N_0^{p^{(1)}}(u) & N_1^{p^{(1)}}(u) & \cdots & N_p^{p^{(1)}}(u) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_0^{p^{(p)}}(u) & N_1^{p^{(p)}}(u) & \cdots & N_p^{p^{(p)}}(u) \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где u – значение параметрической переменной.

При расчетах базисных функций и их производных в граничных точках области определения, то есть при $u = 0$ и $u = 1$ матрица (3) приобретает вид квадратных, треугольных матриц:

$$D(0) = D0 = \begin{bmatrix} N_0^{p^{(0)}} & 0 & \cdots & 0 \\ N_0^{p^{(1)}} & N_1^{p^{(1)}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_0^{p^{(p)}} & N_1^{p^{(p)}} & \cdots & N_p^{p^{(p)}} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$D(1) = D1 = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & N_p^{p^{(0)}} \\ 0 & \cdots & N_{p-1}^{p^{(1)}} & N_p^{p^{(1)}} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \vdots \\ N_0^{p^{(p)}} & \cdots & N_{p-1}^{p^{(p)}} & N_p^{p^{(p)}} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

,

Определение. Два B-сплайна $P'(u)$ и $Q'(u)$ степени p гладко сопряжены с порядком гладкости k, если в точке сопряжений (стыковки) сплайнов выполняются условия:

$$P'^{(k)}(u)|_{u=1} = Q'^{(k)}(v)|_{v=0}, \qquad k \leq (p-1). \tag{6}$$

Выражение (6) представляет собой равенство производных от «нулевого порядка» до -го порядка в точке сопряжения.

Постановка оптимизационной задачи

Рассмотрим B-сплайны $P(u)$ и $Q(v)$, оба сплайна имеют равную степень p:

$$P(u) = \sum_{i=0}^{n} P_i N_{i,p}(u), \qquad u_p \leq u \leq u_{n+1}, \tag{7}$$

$$Q(v) = \sum_{j=0}^{m} Q_j N_{j,p}(v), \qquad v_p \leq v \leq v_{m+1}, \tag{8}$$

где P_i, Q_j, $i = \overline{0,n}$, $j = \overline{0,m}$ – контрольные точки, на которых заданы сплайны $P(u)$ и $Q(v)$, соответственно, u, v – параметрические переменные.

Параметрические переменные u, v сплайнов (6) и (7) определенные на соответствующих узловых векторах U и V:

$$U = \{\underbrace{0, \dots 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_n, \underbrace{1, \dots 1}_{p+1}\}, \tag{9}$$

$$V = \{\underbrace{0, \dots 0}_{p+1}, v_{p+1}, \dots, v_m, \underbrace{1, \dots 1}_{p+1}\}. \tag{10}$$

Постановка задачи состоит в следующем. От исходных (наперед заданных) сплайнов (7) и (8) с минимальными геометрическими изменениями необходимо перейти к сплайнам $P'(u)$ и $Q'(v)$, для которых будут выполнятся условия гладкого сопряжения (6).

Для математической формулировки задачи представим контрольные точки сопряженных кривых как сумму координат контрольных точек исходных кривых и соответствующих отклонений:

$$P'_i = P_i + \varepsilon_i, \quad i = \overline{0,n}, \tag{11}$$

$$Q'_j = Q_j + \delta_j, \quad j = \overline{0,m}, \tag{12}$$

где ε_i, $i = \overline{0,n}$ и δ_j, $j = \overline{0,m}$ приращения соответствующих координат.

Оптимизационную по определению гладко сопряженных кривых запишем следующим образом:

$$J(\varepsilon_i, \delta_j) = \left(\sum_{i=0}^{n} \|\varepsilon_i\|^2 + \sum_{j=0}^{m} \|\delta_j\|^2 \right) \to min \tag{13}$$

Подставляя (11), (12) в условия гладкого сопряжения (6), получаем:

$$\sum_{i=0}^{n} (P_i + \varepsilon_i) N_{i,p}^{(k)}(1) = \sum_{j=0}^{m} (Q_j + \delta_j) N_{j,p}^{(k)}(0), \qquad k = \overline{0,p}, \tag{14}$$

Из (4), (5) следует, что в граничных точках сплайнов (то есть в точке $u = 1$ для сплайнов $P(u)$ и $P'(u)$ и в точке $v = 0$ для сплайнов $Q(v)$ и $Q'(v)$) для k-х производных базисных функций ($k = \overline{0,p}$) отличны от нуля только $(p+1)$ слагаемых в суммах (14). С учетом этого и, раскрыв суммы в (14) можно записать:

$$\begin{gathered} (P_n + \varepsilon_n) N_{n,p}^{(0)}(1) - (Q_0 + \delta_0) N_{0,p}^{(0)}(0) = 0, \\ (P_{n-1} + \varepsilon_{n-1}) N_{n-1,p}^{(1)}(1) + (P_n + \varepsilon_n) N_{n,p}^{(1)}(1) - (Q_0 + \delta_0) N_{0,p}^{(1)}(0) - \\ - (Q_1 + \delta_1) N_{1,p}^{(1)}(0) = 0, \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{p} (P_{n-i} + \varepsilon_{n-i}) N_{n-i,p}^{(p-1)}(1) - \sum_{j=0}^{p} (Q_j + \delta_j) N_{j,p}^{(p-1)}(0) = 0. \end{gathered} \tag{15}$$

В системе уравнений (15) количество неизвестных составляет - $(p+1)$ для ε (то есть неизвестные ε_{n-i}, $i = \overline{0,p}$) и $(p+1)$ для δ (то есть неизвестные δ_j, $i = \overline{0,p}$). Оставшиеся приращения (то есть не входящие в условия гадкого сопряжения, то есть не входящие в систему (15)) положим равными нулю и исключим из оптимизационной задачи (13).

С учетом этого получаем оптимизационную задачу:

$$J(\varepsilon_i, \delta_j) = \left(\sum_{i=0}^{p} \|\varepsilon_{n-i}\|^2 + \sum_{j=0}^{p} \|\delta_j\|^2 \right) \to min, \tag{16}$$

при ограничениях в виде равенств (15).

Метод решения

Для решения оптимизационных задач при ограничениях в виде равенств в основном применяются либо метод неопределенных множителей Лагранжа, либо метод штрафных функций.

Метод множителей Лагранжа дает точное решение, в некоторых случаях обладает плохой обусловленностью. По сравнению с ним метод штрафных функций дает приближенное решение и требует задания множителей в функциях штрафа. При этом какой-либо формальной процедуры определения этих множителей не существует, поэтому задание этих множителей

является самостоятельной дополнительной задачей. Следует иметь в виду, что метод штрафных функций обладает большей обусловленностью по сравнению с методом множителей Лагранжа.

Заключение

В работе рассмотрена постановка задачи гладкого оптимального сопряжения B-сплайнов. Задача сводится к решению оптимизационной задачи при ограничениях в виде равенств. Рассмотрены методы решения задач этого класса.

Список литературы:

1. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование: методическое пособие / Н.Н. Голованов. – Москва: ДМК Пресс, 2020. – 406 с.
2. Ладилова А.А. О геометрическом моделировании поверхностей скругления [Электронный ресурс] / А.А. Ладилова // Графикон-конференции по компьютерной графике и зрению. – 2019. – № 29. – С. 247-248. – DOI: 10.30987/graphicon-2019-1-247-248.
3. Роджерс Д. Математические основы машинной графики: Пер. с англ. / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М.: Мир, 2001. – 604 с.
4. 16. Piegl L. The NURBS book / L. Piegl, W. Tiller. – Springer Science & Business Media, 1997. – 646 p.
5. 17. Rogers D. F. An introduction to NURBS: with historical perspective / D.F. Rogers. – Elsevier, 2000. – 324 p.
6. Повышение производительности контурной механической обработки путем сглаживания пространственной кусочно-линейной траектории и квазиоптимального планирования подач / А. А. Зеленский, Т. Х. Абдуллин, А. В. Алепко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 2(743). – С. 3-17. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-2-3-17.
7. Короткий В. А. Бикубическая ленточная поверхность / В. А. Короткий, Е. А. Усманова // Омский научный вестник. – 2023. – № 2(186). – С. 19-27. – DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-19-27.
8. A review on approaches for handling Bezier curves in CAD for manufacturing / H.N. Fitter, A.B. Pandey, D.D. Patel [at al.] // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 97. – P. 1155-1166.
9. Lu L. An iterative algorithm for G2 multiwise merging of Bézier curves / L. Lu, C. Jiang // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2016. – Vol. 296. – P. 352-361.

МОДЕЛЬ РОЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Горькова А.Е.

Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Сарове, г. Саров

Введение

В последние десятилетия наблюдается интенсивное развитие беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) и их активное внедрение в различные сферы деятельности — от мониторинга окружающей среды до поисково-спасательных операций. Особый интерес представляет групповое применение БпЛА, организованное по принципам роевого интеллекта. Одной из актуальных задач, решаемых с помощью роя БпЛА, является определение местоположения источников радиоизлучения. Традиционные методы пеленгации, как правило, основаны на использовании стационарных или наземных систем, что ограничивает их мобильность и зону покрытия. Применение роя БпЛА позволяет преодолеть указанные ограничения за счёт пространственного разноса агентов, их подвижности и возможности совместной обработки измерений.

Роевой алгоритм

За основу алгоритма формирования роя и поддержания его структуры использовалась модель Boids, предложенная Крейгом Рейнольдсом в 1986 году. Рейнольдс выделил три фундаментальных правила, на основе которых формируется поведение каждого агента – это правила сплоченности, разделения и выравнивания.

- Правило сплоченности необходимо для сохранения целостности роя и предотвращения рассеивания агентов. Оно заключается в том, что каждый агент старается перемещаться в направлении центра масс остальных агентов роя. Таким образом, агенты «тянутся» друг к другу, что способствует образованию плотной и устойчивой структуры роя [1].

Пусть есть рой, состоящий из N агентов, движущихся в двумерном пространстве. Тогда алгоритм правила сплоченности можно формализовать следующим образом:
a. Вычисляется центр масс всех соседних агентов для агента i:

$$\vec{r}_c = \frac{1}{N}\sum_j^N \vec{r}_j$$

где $\vec{r}_j$ – положение соседнего агента j.

b. Проверяется удаленность агента i от центра масс: если он находится в пределах заданной окрестности $R_{\max} > \left|\vec{r}_c - \vec{r}_i\right|$, алгоритм завершается.

c. Рассчитывается вектор скорости для агента i, направленный к центру масс так, чтобы соответствовать текущему модулю скорости.

- Правило разделения применяется для предотвращения столкновений между агентами и соблюдения безопасной дистанции между ними. Оно заключается в том, что каждый агент стремится удалиться от близко находящихся соседей. Это правило компенсирует эффекты правила сплоченности, которое может привести к чрезмерному сближению агентов [1].

Сформируем алгоритм правила разделения:
a. Проверяется удаленность агента i от его соседа j: если он не попадает в заданную окрестность $R_{\min} < \left|\vec{r}_i - \vec{r}_j\right|$, алгоритм завершается.

b. Проверяется возможность «лобового» столкновения агента i с приближающимся агентом j: если данная возможность не подтверждается, переходим к пункту d.
c. В случае вероятности «лобового» столкновения агент i меняет свое направление на противоположное, сохраняя модуль скорости прежним, и алгоритм завершается.
d. Рассчитывается вектор скорости для агента i так, чтобы направление оставалось прежним, а модуль скорости уменьшался на 50%.

- Правило выравнивания необходимо для обеспечения упорядоченного и скоординированного перемещения группы. Оно заключается в том, что каждый агент стремится привести своё направление и скорость движения в соответствие со средним направлением и скоростью своих соседей [1].

В рамках разработанного алгоритма данное правило применяется также в задаче корректировки траекторий агентов роя, которая возникает при необходимости согласованного движения группы к заданной цели. В данном случае цель представляет собой область пространства, которая задается целевой точкой.

Считается, что рой достиг целевой точки, если центр масс всех агентов роя попал в некоторую заданную окрестность данной точки. В связи с этим, вектор скорости каждого агента должен корректироваться в соответствии с направлением движения центра масс роя к целевой позиции.

Тогда алгоритм правила выравнивания можно формализовать следующим образом:
a. Вычисляется центр масс всех агентов роя:

$$\vec{r}_c = \frac{1}{N}\sum_j^N \vec{r}_j$$

где $\vec{r}_j$ – положение агента j.

b. Проверяется «попадание» центра масс агентов роя в заданную ε-окрестность целевой точки $\vec{r}_t$: если неравенство $\varepsilon \geq \left|\vec{r}_c - \vec{r}_t\right|$ выполняется, алгоритм завершается.

c. Вычисляется вектор скорости в направлении движения центра масс на целевую точку и присваивается всем агентам роя.

Таким образом, алгоритм формирования роя и поддержания его структуры можно сформулировать с использованием разработанных алгоритмов для правил модели Boids:
a. Инициализация роя БпЛА: количество агентов роя и их начальные позиции, модуль скорости, которого необходимо придерживаться на всем пути следования, максимальное и минимальное расстояния между агентами, целевые точки для перемещения.
b. Проверка условия остановки: если рой достиг последней целевой точки, алгоритм завершается.

c. Обмен информацией: агенты сообщают друг другу координаты своего местоположения и вектор скорости.
d. Вызов алгоритмов выравнивания, сплоченности и разделения.
e. Обновление позиций БпЛА и возвращения к шагу b.

Алгоритм роевого применения БпЛА для задач пеленгации источников излучения

Для решения задачи определения местоположения источника излучения группой БпЛА в рамках данной работы используется фазовый метод определения угловых координат.

Простейший фазовый пеленгатор содержит две одинаковые антенны, разнесенные в пространстве на известное расстояние, называемое обычно базой d. При отклонении цели на угол α от равносигнального направления (направления, отсчитываемого от перпендикуляра к центру базы) возникает разность хода сигналов

$$\Delta R = d \sin \alpha.$$

Тогда относительное запаздывание сигналов

$$\tau = \frac{\Delta R}{c} = \frac{d}{c} \sin \alpha.$$

Разность фаз принимаемых сигналов составляет величину

$$\Delta \varphi = 2\pi f_0 \tau = 2\pi \frac{f_0}{c} d \sin \alpha = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha.$$

Следовательно, информацию об угловой координате цели можно получить, измерив разность фаз и используя соотношение [2]

$$\alpha = \arcsin\left[\Delta\varphi / \left(2\pi d / \lambda\right) \right].$$

В процессе приема радиолокационных сигналов решается задача измерения (оценки) параметров сигнала. Тогда задача оценивания угловой координаты сводится к оценке разности фаз принимаемых сигналов:

$$\hat{\alpha} = \arcsin\left[\frac{1}{2\pi d} \left(\hat{\varphi}_2 - \hat{\varphi}_1 \right) \right].$$

Для этого будем использовать метод максимального правдоподобия:

$$\hat{\varphi} = arctg \frac{Z_S}{Z_C},$$

где $Z_C = \int_0^T x(t) \cos \omega t dt$ и $Z_S = \int_0^T x(t) \sin \omega t dt$, $x(t)$ – принятый сигнал [3].

Следует учитывать, что фазовый метод пеленгации определяет угловую координату относительно перпендикуляра к центру базы антенной системы. Поскольку в процессе движения агентов на плоскости ориентация антенной решетки относительно глобальной системы координат изменяется, возникает необходимость преобразования угловых координат из локальной системы отсчета в глобальную.

Для этого предположим, что антенная решетка всегда располагается перпендикулярно вектору скорости агента. Тогда ось ординат сонаправлена с вектором скорости агента, а ось абсцисс лежит вдоль базы пеленгатора. Таким образом, угол поворота локальной системы координат относительно глобальной можно вычислить через компоненты вектора скорости

$$\gamma = arctg \frac{V_x}{V_y}.$$

После чего угловую координату можно пересчитать в глобальной системе координат

$$\alpha_{gl} = \alpha_{loc} + \gamma,$$

где α_{loc} – угловая координата в локальной системе.

Таким образом, алгоритм пеленгации источников излучения можно формализовать следующим образом:
a. Регистрация сигнала источника излучения антеннами БпЛА.
b. Вычисление угловых координат источника излучения фазовым методом в локальной системе координат агента.

c. Расчет угловой координаты источника излучения в глобальной системе координат.
d. Обмен информацией: агенты сообщают друг другу координаты своего местоположения и вычисленные угловые координаты источника излучения в глобальной системе координат.
e. Расчет координат местоположения источника излучения.

Реализация алгоритма роевого применения БпЛА для задач пеленгации источника излучения

Программная реализация предложенного алгоритма осуществлена на языке C# с созданием графического интерфейса (рисунок 1), позволяющим наблюдать динамику перемещения агентов и анализировать поведение роя при различных сценариях. Для обеспечения гибкости экспериментальных исследований все регулируемые характеристики модели вынесены на панель управления, что позволяет проводить серии экспериментов с различными конфигурациями без внесения изменений в программный код.

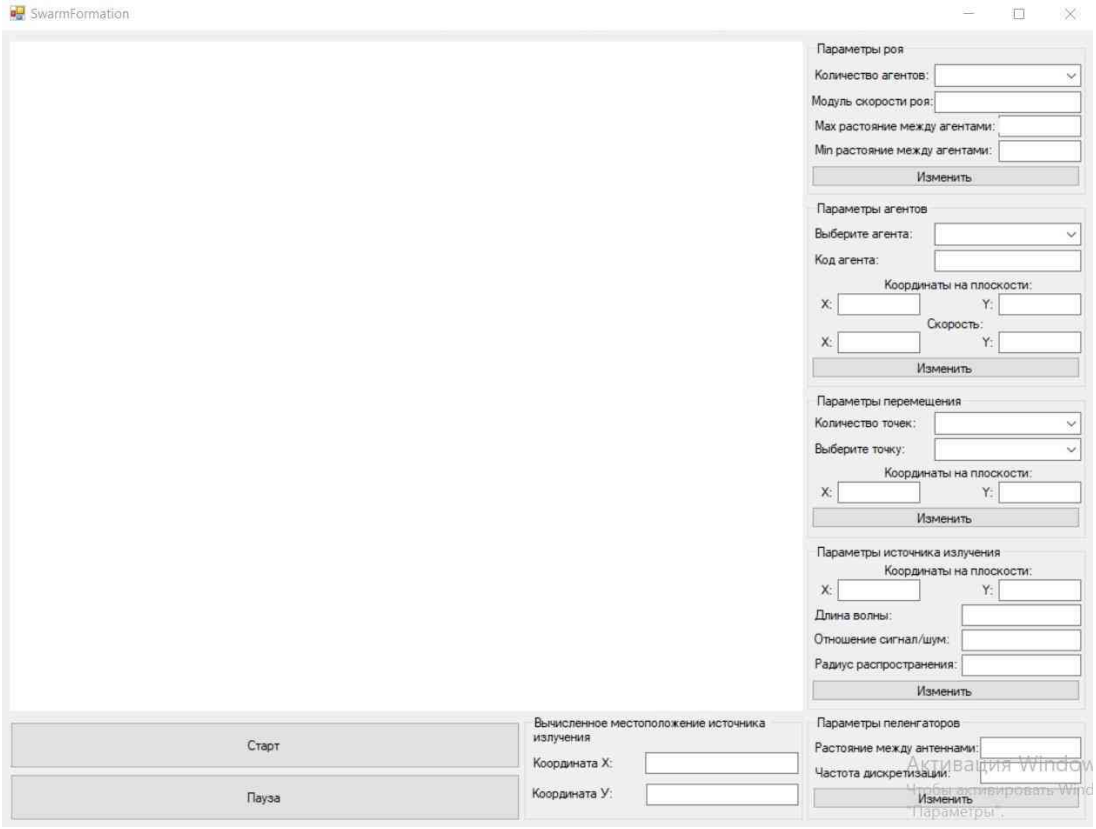


Рисунок 1. Интерфейс программы

Заключение

В ходе выполнения данной работы разработана модель роевого применения БпЛА для задач пеленгации источников радиоизлучения. На основе модели Boids создан алгоритм формирования роя и поддержания его структуры, включающий правила сплоченности, разделения и выравнивания, обеспечивающие согласованное движение группы и предотвращение столкновений. Для решения задачи пеленгации предложен алгоритм, использующий фазовый метод определения угловых координат с последующим пересчётом из локальной системы отсчёта в глобальную и обменом данными между агентами для триангуляции источника.

Разработанные алгоритмы программно реализованы на языке C# с графическим интерфейсом, позволяющим визуализировать движение агентов. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенных алгоритмов. Поставленная цель достигнута, а разработанная модель может служить основой для дальнейших исследований в области роевого применения БпЛА для задач радиотехнической разведки.

Список литературы:
1. Reynolds C.W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model / C.W. Reynolds // Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '87). – New York: Association for Computing Machinery, 1987. – P. 25–34.
2. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации / В.Е. Дулевич. – Москва: Советское радио, 1978. – 608 с.
3. Кречетков А.Д. Оценка параметров радиосигналов: методические указания к выполнению лабораторных работ / А.Д. Кречетков, В.П. Пашкевич. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская государственная академия аэрокосмического приборостроения, 1996. – 37 с.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ИСТОЧНИКАМИ МАССЫ И ТЕПЛА

Гришин Д.А.[1], Маврин С.В.[2]
[1]*Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Сарове*
[2]*Саровский физико–технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров*

Введение

Пористые среды широко используются в теплообменных, фильтрационных и реакторных системах, где одновременно протекают процессы движения газа, переноса вещества и теплообмена. Для корректного описания таких процессов требуется совместное рассмотрение фильтрации, теплопереноса и массопереноса в рамках единой математической модели.

Для описания тепловых процессов в пористой среде используется двухтемпературный подход, позволяющий раздельно учитывать температуры твёрдой и газовой фаз [1]. Это особенно важно в условиях, когда между фазами возникает тепловое неравновесие. Уравнения переноса компонент, в свою очередь, позволяют исследовать влияние конвекции и диффузии на распределение вещества в области [2, 4].

В работе рассматривается нестационарная сопряжённая задача для пористой среды и проводится численное исследование влияния параметров модели на распределения температуры и концентрации.

Постановка задачи

Рассматривается перенос вещества и тепла в пористой среде, сопровождающийся фильтрацией газа и межфазным теплообменом. Расчётная область представляет собой прямоугольник, схема которого приведена на рисунке 1. Левая граница области соответствует входу, правая – выходу. На входной границе выделены два участка, γ_1 и γ_2 на которых задаются значения концентраций первой и второй компонент соответственно. Верхняя и нижняя границы рассматриваются как твёрдые стенки области.

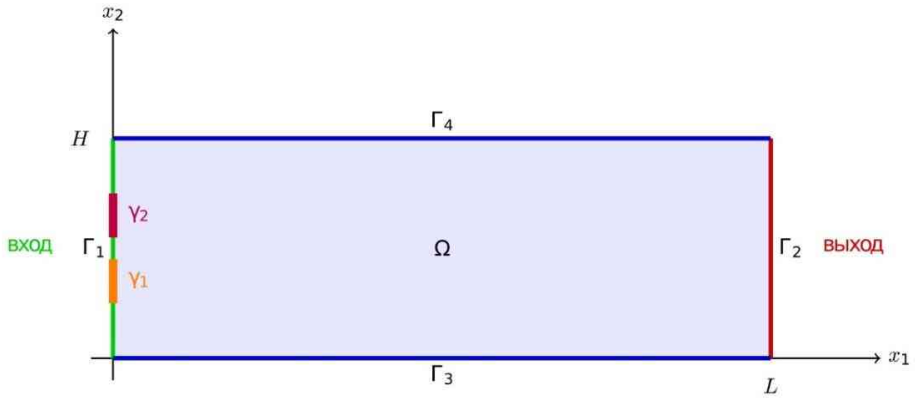


Рис. 1. Расчётная область и граничные участки

Для давления на левой и правой границах области задаются условия Дирихле, соответствующие входному и выходному значениям давления. Для температур газа и твёрдой фазы на входной границе также задаются условия Дирихле. На участках γ_1 и γ_2, выделенных на входной границе, задаются значения концентраций первой и второй компонент соответственно. На выходной границе для уравнений переноса компонент и температуры газа

принимаются естественные (мягкие) граничные условия. На верхней и нижней границах для компонент и газовой фазы задаются условия отсутствия потока, а для твёрдой фазы учитывается теплообмен с внешней средой.

Математическая постановка

Для описания процессов, протекающих в пористой среде, используется математическая модель, объединяющая уравнение фильтрации газа, уравнения переноса компонент и двухтемпературную модель теплопереноса. Для замыкания системы используется уравнение состояния идеального газа.

Требуется определить давление газа p концентрации компонент c_1, c_2, а также температуры твёрдой и газовой фаз T_s и T_g, удовлетворяющие в области Ω системе:

$$\varphi \frac{\partial \rho_g}{\partial t} - \operatorname{div}\left(\rho_g \frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p \right) = 0,$$

$$\varphi \frac{\partial c_i}{\partial t} - \operatorname{div}\left(c_i \frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p \right) - \varepsilon_i \operatorname{div}(\operatorname{grad} c_i) = q_i, \qquad i = 1,2,$$

$$(1-\varphi)\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} - \operatorname{div}\left((1-\varphi)\lambda_s \operatorname{grad} T_s\right) = \alpha(T_g - T_s),$$

$$\varphi\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} - \varphi\rho_g c_g \frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p \cdot \operatorname{grad} T_g - \operatorname{div}\left(\varphi\lambda_g \operatorname{grad} T_g\right) = \alpha(T_s - T_g),$$

$$\rho_g = \frac{p}{R_g T_g}.$$

Здесь φ – пористость, k – проницаемость, μ – вязкость газа, ε_i – коэффициенты диффузии компонент, q_i – источники вещества, ρ_s, ρ_g – плотности фаз, c_s, c_g – их теплоёмкости, λ_s, λ_g – коэффициенты теплопроводности, α – коэффициент межфазного теплообмена, R_g – газовая постоянная.

На верхней и нижней границах области для температуры твёрдой фазы задаётся граничное условие третьего рода:

$$-(1-\varphi)\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = \beta(T_s - T_{\text{ext}}),$$

где β – коэффициент теплоотдачи с внешней средой, T_{ext} – температура внешней среды, n – внешняя нормаль к границе.

Численный метод

Численное решение задачи строится методом конечных элементов [4]. Расчётная область разбивается на прямоугольную сетку с n_1 и n_2 разбиениями по координатам x_1 и x_2, после чего каждая ячейка делится на треугольные конечные элементы. В качестве базисных функций используются лагранжевы конечные элементы первого порядка.

Для дискретизации по времени применяется неявная схема. На каждом временном шаге формируются дискретные системы уравнений для давления, температур и концентраций, после чего вычисленные значения используются при переходе к следующему временному слою.

Верификация численного алгоритма проводилась на последовательности сеток. Для этого сравнивались решения, полученные на сетках различной детальности, и анализировалось поведение погрешности при измельчении сетки. Проведённые расчёты показали уменьшение ошибок по мере уменьшения характерного размера элемента, что подтверждает сходимость применяемой конечноэлементной аппроксимации.

Результаты численных экспериментов

Вычислительные эксперименты проводились для исследования влияния параметров модели на характер температурных и концентрационных полей.

Для тепловой части задачи рассматривалось влияние коэффициента межфазного теплообмена α. Увеличение этого параметра приводит к усилению тепловой связи между твёрдым каркасом и газовой фазой. В результате температурные различия между фазами уменьшаются, а распределения T_s и T_g становятся более согласованными.

Отдельно исследовалось влияние коэффициента теплоотдачи β на твёрдых стенках. При увеличении β теплообмен твёрдого каркаса с внешней средой становится более интенсивным, что приводит к снижению температурного уровня в расчётной области и более выраженному охлаждению твёрдой фазы вблизи границ.

Для задачи массопереноса изучалось влияние коэффициентов диффузии ε_1 и ε_2. При малых значениях этих коэффициентов распределения концентраций сохраняют более локализованный характер и в большей степени определяются конвективным переносом. С увеличением диффузии концентрационные поля становятся более сглаженными, а области распространения компонент расширяются.

Нестационарные расчёты показали, что на различных этапах процесса существенно изменяется пространственная структура температурных и концентрационных полей. Это позволяет использовать предложенную модель для анализа переходных режимов, в которых важны как локальные особенности распределений, так и влияние параметров модели на динамику решения.

Заключение

Численные расчёты показали, что предложенный подход позволяет исследовать нестационарные режимы в пористой среде с учётом совместного влияния фильтрации, теплопереноса и массопереноса. Установлено, что параметры межфазного теплообмена, теплоотдачи и диффузии заметно влияют на формирование температурных и концентрационных полей. Сходимость численного алгоритма подтверждена в ходе расчётов на последовательности сеток. Результаты работы могут быть использованы при моделировании связанных процессов в пористых элементах инженерных систем.

Список литературы:

1. Nield D. A., Bejan A. Convection in Porous Media. 3rd ed. New York: Springer, 2006.
2. Zheng C., Wang P. P. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems: Documentation and User's Guide. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, Contract Report SERDP-99-1, 1999.
3. Clement T. P., Peyton B. M., Skeen R. S., Jennings D. A., Petersen J. N. Microbial growth and transport in porous media under denitrification conditions: experiments and simulations // Journal of Contaminant Hydrology. 1997. Vol. 24. P. 269–285.
4. Коннор Дж., Бреббия К. Метод конечных элементов в механике жидкости. М.: Мир, 1979.

РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОРИСТОЙ ОБЛАСТИ

Ерофеев Е.Н.[1], Маврин С.В.[2]

[1]Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Сарове
[2]Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Процессы фильтрации и теплопереноса в пористых средах играют важную роль при исследовании тепло- и массообмена в различных природных и технических системах. Движение газа в поровом пространстве сопровождается переносом энергии, поэтому распределения температуры, давления и плотности среды являются взаимосвязанными.

Во многих прикладных задачах рассматриваемая область обладает осевой симметрией, что позволяет использовать цилиндрическую систему координат и упростить математическую постановку.

В настоящей работе рассматривается краевая задача фильтрационно-тепловых процессов в осесимметричной пористой области, для численного решения которой применяется метод контрольных объёмов.

Постановка задачи

Рассматривается задача фильтрационно-теплового переноса в пористой области цилиндрической формы. Геометрия области обладает осевой симметрией, поэтому исследование проводится в цилиндрической системе координат. В расчетной постановке рассматривается меридиональное сечение цилиндра, представляющее собой прямоугольную область в координатах r и z, где r – радиальная координата, z – осевая координата.

Внутри пористой среды происходит движение газа по поровому пространству, вызванное перепадом давления. Движение газа сопровождается переносом тепла, вследствие чего формируются распределения температуры, давления и плотности газа. Пористый скелет считается неподвижным, а его теплофизические характеристики предполагаются заданными.

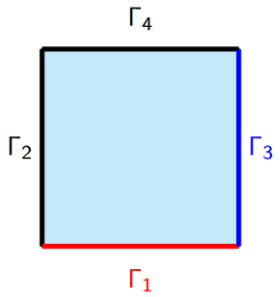


Рис. 1. Геометрия расчетной области

Граница расчётной области состоит из четырёх участков (рис. 1): Γ_1— нижнее основание цилиндра, соответствующее входу газа; Γ_2— ось симметрии; Γ_3— боковая стенка; Γ_4— верхнее основание, соответствующее выходу газа.

На границе Γ_1задаются постоянные значения температуры и давления газа. На границе Γ_2, являющейся осью симметрии, отсутствует перенос величин в радиальном направлении. На границе Γ_3задаётся постоянная температура стенки и условие непроницаемости для газа. На границе Γ_4задаётся известное давление, а для температуры принимается условие отсутствия теплового потока вдоль осевого направления.

В начальный момент времени во всей области задаются начальные распределения температуры и давления. Требуется определить нестационарные распределения температуры, давления и плотности газа в пористой области трубы при заданных начальных и граничных условиях.

Математическая модель

Математическая модель фильтрационно-тепловых процессов в пористой среде включает уравнение сохранения массы газа, уравнение теплопереноса, закон фильтрации Дарси и уравнение состояния газа. Рассматривается нестационарный процесс тепломассопереноса в осесимметричной пористой области.

Уравнение неразрывности, описывающее изменение массы газа в пористой среде, имеет вид

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\rho_f v\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho_f u\right) = 0,$$

где ρ_f – плотность газа, u и v – компоненты скорости фильтрации газа в осевом и радиальном направлениях соответственно.

Уравнение теплопереноса с учетом конвективного переноса энергии движущимся газом и теплопроводности в пористой среде записывается в виде [1]

$$\left(\rho c\right)_m \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_f \left(u\frac{\partial T}{\partial z} + v\frac{\partial T}{\partial r}\right) = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_m \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial z}\right).$$

Скорость фильтрации газа в пористой среде определяется законом Дарси

$$v = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial P}{\partial r}, \qquad u = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial P}{\partial z},$$

где k – проницаемость пористой среды, μ – динамическая вязкость газа.

Связь между давлением, плотностью и температурой газа задается уравнением состояния идеального газа

$$P = \rho_f RT$$

где P – давление газа, T – температура, R – газовая постоянная.

В приведенных уравнениях используются следующие обозначения:

$(\rho c)_m$ – эффективная объемная теплоемкость пористой среды, c_f – удельная теплоёмкость газа, ρ_f – плотность газа, λ_m – эффективный коэффициент теплопроводности пористой среды.

Представленная система уравнений описывает совместный процесс фильтрации газа и переноса тепла в осесимметричной пористой области и позволяет определить нестационарные распределения температуры, давления, плотности и скорости фильтрации газа.

Численный метод

Для численного решения системы уравнений используется метод контрольных объемов [2]. Расчетная область разбивается на равномерную прямоугольную сетку в координатах r и z. Каждая ячейка сетки соответствует контрольному объему, для которого записываются интегральные формы уравнений сохранения.

Основные переменные задачи – температура, давление и плотность газа – определяются в центрах расчетных ячеек. Компоненты скорости фильтрации определяются на гранях контрольных объемов.

На рис. 2 показана структура расчетной сетки и расположение контрольного объема с индексами (i, j) и его соседних ячеек.

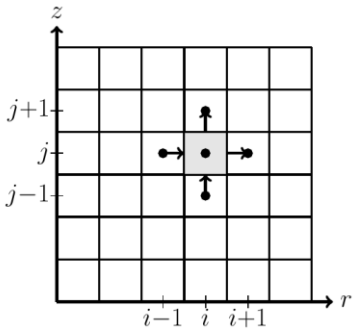


Рис. 2. Расчетная сетка и расположение контрольного объема

Аппроксимация системы уравнений

-**Скорости фильтрации** определяются на гранях контрольных объёмов по закону Дарси:

$$v_{i,j}^n = -\frac{k}{\mu}\frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta r}, \qquad u_{i,j}^n = -\frac{k}{\mu}\frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta z}.$$

Здесь $v_{i,j}^n$ – радиальная скорость на грани между ячейками (i, j) и $(i+1, j)$, $u_{i,j}^n$ – осевая скорость на грани между ячейками (i, j) и $(i, j+1)$, k – проницаемость пористой среды, μ – динамическая вязкость газа.

-Уравнение теплопереноса. После вычисления скоростей аппроксимируется уравнение теплопереноса. Для контрольного объёма с индексами (i, j) дискретное уравнение имеет вид:

$$\left(\rho c\right)_{eff,i,j}^{n} V_i \frac{T_{i,j}^{n+1}-T_{i,j}^{n}}{\Delta t} = S_i^{r-}\left(-\lambda_{eff}\frac{T_{i,j}^{n}-T_{i-1,j}^{n}}{\Delta r}+c_f\rho_{i-1,j}^{n}v_{i-1,j}^{n}T_{i-1,j}^{n}\right)$$

$$-S_i^{r+}\left(-\lambda_{eff}\frac{T_{i+1,j}^{n}-T_{i,j}^{n}}{\Delta r}+c_f\rho_{i,j}^{n}v_{i,j}^{n}T_{i,j}^{n}\right)+S_i^{z-}\left(-\lambda_{eff}\frac{T_{i,j}^{n}-T_{i,j-1}^{n}}{\Delta z}+c_f\rho_{i,j-1}^{n}u_{i,j-1}^{n}T_{i,j-1}^{n}\right)$$

$$-S_i^{z+}\left(-\lambda_{eff}\frac{T_{i,j+1}^{n}-T_{i,j}^{n}}{\Delta z}+c_f\rho_{i,j}^{n}u_{i,j}^{n}T_{i,j}^{n}\right)$$

Здесь V_i – объём контрольного объёма, S_i^{r-}, S_i^{r+}, S_i^{z-}, S_i^{z+} – площади левой, правой, нижней и верхней граней контрольного объёма соответственно. Эффективная объёмная теплоёмкость на временном слое n определяется выражением:

$$\left(\rho c\right)_{eff,i,j}^{n} = \left(1-\varepsilon\right)\rho_s c_s + \varepsilon\rho_{i,j}^{n} c_f .$$

-**Уравнение неразрывности**:

$$\varepsilon V_i \frac{\rho_{i,j}^{n+1}-\rho_{i,j}^{n}}{\Delta t} = S_i^{r-}\rho_{i-1,j}^{n}v_{i-1,j}^{n} - S_i^{r+}\rho_{i,j}^{n}v_{i,j}^{n} + S_i^{z-}\rho_{i,j-1}^{n}u_{i,j-1}^{n} - S_i^{z+}\rho_{i,j}^{n}u_{i,j}^{n} .$$

Здесь ε – пористость среды.

-**Уравнение состояния.** После вычисления плотности давление в центре ячейки определяется по уравнению состояния идеального газа:

$$P_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^{n+1} R T_{i,j}^{n+1},$$

где R – газовая постоянная.

Таким образом, расчёт на каждом временном шаге выполняется в следующем порядке: сначала по полю давления определяются скорости фильтрации, затем вычисляется температура, после этого – плотность, и на завершающем этапе обновляется давление.

Ограничение шага по времени

Шаг по времени выбирается из условий устойчивости численной схемы. В расчётах учитываются ограничения, связанные с конвективным переносом, теплопроводностью и допустимым приращением переменных.

Ограничение, связанное с конвекцией, определяется условием

$$\Delta t \le \min\left(\frac{\Delta r}{|v|}, \frac{\Delta z}{|u|}\right).$$

Ограничение, обусловленное теплопроводностью, записывается в виде

$$\Delta t \le \frac{\left(\rho c\right)_m}{\lambda_m}\left(\frac{1}{\frac{1}{\Delta r^2}+\frac{1}{\Delta z^2}}\right).$$

Кроме того, шаг по времени ограничивается условием на допустимое относительное приращение переменных. Итоговый шаг по времени на каждом временном шаге выбирается как минимальный из полученных значений.

Заключение

Разработана численная модель фильтрационно-тепловых процессов в осесимметричной пористой области. На основе метода контрольных объёмов получена дискретная форма

системы уравнений и сформирован алгоритм расчёта. Предложенный подход позволяет исследовать распределения температуры, давления и плотности газа в пористой среде при заданных граничных условиях.

Список литературы:

1. Nield D.A., Bejan A. Convection in Porous Media. – 4th ed. – New York: Springer, 2013. – 778 p.
2. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. – 197 p.

МЕТОДИКА ПОРТИРОВАНИЯ FLUTTER ПЛАГИНОВ ДЛЯ ОС АВРОРА

Овчинников С.М., Звягин К.Н.
ООО «ОТКРЫТАЯ МОБИЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА», г. Иннополис

Введение

ОС Аврора представляет собой российскую мобильную операционную систему, с закрытым исходным кодом. Благодаря сертификации ФСТЭК России по УД4 и встроенным механизмам безопасности, она формирует основу национальной доверенной мобильной среды, подходящей для использования в государственных и корпоративных структурах. Для успешного развития платформы важно наличие прикладных мобильных приложений, формирующих экосистему приложений. В данный момент для создания прикладных приложений могут применяться 2 кроссплатформенных фреймворка: Qt или Flutter.

Flutter — это открытый и бесплатный набор инструментов (SDK) от Google для создания кроссплатформенных приложений. С его помощью можно разрабатывать программы для мобильных устройств на ОС Android, iOS, также для Web, настольных операционных систем Windows, macOS, Linux, используя единую кодовую базу на языке Dart. Ключевое преимущество Flutter - собственный движок Impeller (в прошлом Skia) для рендеринга графики, позволяющие обеспечить высокую производительность и единую отрисовку на различных платформах. Благодаря полной открытости исходного кода и архитектуре фреймворка команда разработчиков Открытой Мобильной Платформы смогла адаптировать Flutter под ОС Аврора.

Однако перенос приложений созданных под Android OS, iOS или написание приложений для ОС Аврора на фреймворке Flutter почти невозможен без использования плагинов. Плагины — это специальные библиотеки, соединяющие Dart код с кодом конкретной нативной платформы: Java для Android OS, Swift для iOS, C++ для ОС Аврора. Плагины реализуют взаимодействие с системными библиотеками (WebView), API ОС (камера, вибрации, звонки), так и позволяют использовать специализированные библиотеки (SQLite, OpenCV, PDFium) [15].

Целью данной работы является систематизация знаний о процессе миграции плагинов, анализ существующих решений, формирование методики портирования Flutter плагинов под ОС Аврора.

На основе опыта разработки и портирования плагинов под ОС Аврора были выявлены следующие ключевые шаги в портирование Flutter плагинов под ОС Аврора:

- Анализ исходного плагина
- Анализ API ОС Аврора и библиотек
- Реализация плагина
- Тестирование плагина

1. Анализ исходного плагина

Анализ исходного плагина является первым и самым важным этапом при портировании Flutter плагина на ОС Аврора. Суть данного этапа заключается в получении информации об: архитектуре плагина; поддерживаемых платформах и способах реализации под данные платформы; зависимостях и ограничениях плагина.

В Flutter существует несколько способов построения плагинов:

1. Федеративная схема [1] — при такой схеме плагин состоит из 3 и более пакетов: пакет с интерфейсом плагина; пакет или пакеты содержащие отдельные реализации под конкретные платформы, такие как Android, iOS, Windows, реализующие интерфейс плагина; пакет для работы с приложением, объединяющий интерфейс плагина и их реализации. Такая реализация считается новым стандартом разработки Flutter плагинов и существенно упрощает разработку плагинов и поддержку их для различных платформ;

2. Стандартная схема — при такой схеме реализация под различные платформы находятся в едином пакете, такой пакет может не иметь выделенного интерфейса. Такая схема построения плагинов является устаревшей, но множества плагинов использую ею в текущий момент.

Передача данных между нативным кодом и Dart-кодом во Flutter осуществляется несколькими способами:

1. Платформенные каналы — представляют собой механизм асинхронной межпроцессной коммуникации, обеспечивающий двустороннее взаимодействие между Dart-кодом фреймворка и нативным кодом платформы. Ключевым преимуществом является автоматическая сериализация данных в эффективный бинарный формат, для передачи без больших накладных расходов и блокировок UI;
2. FFI — механизм Foreign Function Interface, реализованный в библиотеке dart:ffi [2]. Он позволяет напрямую взаимодействовать с кодом, скомпилированным в C-совместимые библиотеки. Такой подход позволяет исключить затраты на сериализацию данных, и получать максимальную производительность от нативных библиотек.

Структура директорий Flutter плагина организована как иерархическая система, предназначенная для разделения Dart кода и нативных реализаций:

- lib/ — директория с Dart кодом. Основное назначение данной части: определять интерфейс плагина, реализовывать внутреннюю логику и взаимодействие с нативной частью плагина;
- платформенные директории (android/, aurora/, ios/ и т.д.) — с нативными реализациями на Java/Kotlin и Swift, C++ под конкретные платформы. Основное назначение данной части: взаимодействие с API платформы, подключение библиотек.

В зависимости от схемы и способа передачи данных плагин будет содержать одну или несколько директорий с кодом.

В ходе анализа необходимо изучить файловую структуру плагина. Ключевые точки для анализа: конфигурационный файл pubspec.yaml, содержащий зависимости, и поддерживаемые платформы; директории с нативным кодом Android, iOS, Windows и т.д.; а также Dart-код в директории lib/, в котором описаны интерфейсы и взаимодействие с платформой.

Особое внимание при анализе Dart-кода в директории lib/ следует уделить конструкции:

```
if (!Platform.isAndroid) { … }
```

которые разделяет логику в коде в зависимости от платформы, или отключают возможность работы иных платформ.

В результате анализа: архитектуры плагина, поддерживаемых платформ, способов реализации, зависимостей плагина, и его ограничений —должен получиться набор сведений об: архитектуре плагина (плагин федеративный или стандартный); способе коммуникации с нативной платформой (платформенные каналы или FFI); используемых зависимостях, библиотеках (названия, версии, способы подключения); наличие ограничений в исходном плагине, которые будут использованы для портировании Flutter плагина на Ос Аврора

2. Анализ API ОС Аврора и библиотек

Следующим этапом анализа является исследование системных API ОС Аврора [16] и доступных библиотек с целью реализации платформозависимой логики портируемого плагина.

На ОС Аврора можно выделить три основных категории API:

1. Qt API— Qt основной фреймворк разработки, предоставляющий готовые компоненты для работы с основными возможностями устройства. Для Flutter разработки реализована поддержка сигналов и слотов для Qt библиотек.[3]
2. D-Bus API — API построенное на системе межпроцессного взаимодействия D-Bus для доступа к системным службам. D-Bus API покрывает лишь небольшую часть системных API. [4]
3. C++ API — набор нативных библиотек и API, предоставляющих максимальную производительность и полный доступ к функциям ОС. [5]

Отдельного внимания заслуживает анализ исходного кода Flutter Embedder для ОС Аврора [6]. Flutter Embedder — это библиотека на языке C++, которая выступает в роли промежуточного слоя между платформонезависимым движком Flutter Engine и ОС Аврора. Flutter Embedder предоставляет API который можно использовать для реализации Flutter плагинов.

При выборе собранной библиотеки для ОС Аврора необходимо убедиться в поддержке целевых архитектур armv7hl, arch64 для физических устройств и x86_64 для эмулятора. Библиотеки можно использовать в виде собранных .so библиотек, так и собирать собственные библиотеки с помощью Platform SDK [7].

Перспективным подходом к реализации недостающей функциональности является повторное использование существующих портированных плагинов с схожим функционалом. Повторное использование позволяет не только сократить временные затраты на разработку, но и гарантировать корректность взаимодействия с системными API ОС Аврора за счет применения уже отлаженных решений.

Результатом анализа API и библиотек проведённого анализа будет набор API и библиотеки, которые будут подходить для реализации функционала плагина под ОС Аврора. В редких случаях: отсутствия системного API, отсутствия требуемых сервисов, требуется или поиск альтернативных решений, использование заглушек или обращение в техподдержку компании Открытая Мобильная платформа с вопросом предоставления недостающего API для проекта.

3. Реализация плагина

В процессе адаптации существующих плагинов для ОС Аврора критически важным этапом является выбор архитектурного шаблона реализации, а также определение технического способа взаимодействия с системными API и библиотеками.

3.1 Классификация подходов реализации плагинов

В зависимости от степени необходимой модификации исходного кода и требований к функциональности, можно выделить три основных способа реализаций плагина:

1. Реализация по федеративной схеме — создаётся отдельный полностью изолированный пакет с реализацией для ОС Аврора, который не затрагивает основную кодовую базу плагина и его реализации для других операционных систем;
2. Реализация только нативной части — фреймворк Flutter допускает поставку отдельного пакета, содержащего исключительно платформенную реализацию. Данный подход возможен при точном соблюдении интерфейсов оригинального плагина и названия каналов. Но при таком подходе изменения в интерфейсе плагина, могут вскрыться в результате эксплуатации.
3. Модификация оригинального плагина — в ряде ситуации единственным эффективным решением является внесение изменений в оригинальный плагин. Данный подход применим, если плагин имеет ограничения в исходном коде.

3.2. Механизмы взаимодействия с системным API и библиотеками

В зависимости от доступности API, библиотек и архитектурных особенностей доступны различные способы взаимодействия с ними:

1. Платформенные каналы — применяется в случае, если есть доступное Qt API, C++ API или библиотеки с C++ функционалом. Является самым распространенным механизмом взаимодействия.
2. FFI — является предпочтительным способов для высокопроизводительных библиотек, предоставляющих C-интерфейс;
3. D-Bus — применяется в случае существования подходящего D-Bus API в ОС Аврора. В основе данного подхода лежит пакет dbus [8], что позволяет написание реализовать взаимодействие с сервисами исключительно на стороне Dart, без необходимости написания дополнительного нативного кода на C++. В случаях, когда требуется более тесная интеграция с Qt-ориентированными сервисами, может быть оправдано применение Qt D-Bus[9] на нативной стороне;
4. Композиция на основе других плагинов [14] — в некоторых случаях требуемый функционал может быть реализован не напрямую, а путём вызова функций другого, уже адаптированного под ОС Аврора плагина;

3.3. Конфигурация плагинов для корректной работы

ОС Аврора предъявляет повышенные требования к конфигурации приложения и настройке его сборки для обеспечения приватности и безопасности. Для корректного функционирования плагина необходимо формирование следующих артефактов сборки и конфигурации:

- Desktop файл — файл конфигурации, декларирующего возможности и требования приложения [10]:
  - Permissions — разрешения являются важным параметром, отсутствие необходимых для работы плагина прав, например доступ к датчикам, файловой системе, интернету, приводит к

невозможности корректного выполнения работы плагина. Таким образом плагин будет некорректно работать без явных ошибок в коде;

- Специализированные параметры. В зависимости от функционала плагина могут потребоваться следующие настройки:
  - ExecDBus и ExportDBusInterfaces — для регистрации собственных D-Bus интерфейсов и их экспорта за пределы песочницы приложения;
  - Intents — для регистрации собственных и системных интентов в ОС;
  - MimeType — для указания MIME-типов, которые способно обрабатывать приложение.
- Spec-файл для сборки RPM-пакета. Обеспечивает корректную сборку и связывание компонентов на этапе компиляции и упаковки [11].
  - BuildRequires — требуется для явного указания библиотек, требуемых для компиляции нативной части плагина;
  - __requires_exclude — данный макрос используется для предотвращения ошибок линковки или включения избыточных зависимостей в пакет;
- Конфигурация среды выполнения Qt. При использовании в нативной части Qt компонентов, использующих механизм сигналов и слотов, необходимо обеспечить явную декларацию поддержки механизма сигналов и слотов в нативном коде.

Таким образом, выбор архитектурного шаблона и технологического стека должен сопровождаться тщательной настройкой метаданных приложения, что является необходимым условием для стабильной и безопасной работы Flutter приложений в среде операционной системы Аврора.

4. Тестирование плагина

По причине архитектурных особенностей Flutter, который не предоставляет полноценный способ протестировать плагины, единственным способом проверки их работоспособности является их интеграция в приложение. В контексте разработки плагинов создаётся специализированное тестовое приложение-пример(example), который помогает провести отладку и тестирование функционала, одновременно демонстрируя способ использования API плагина.

Пример приложения должен включать в себя не только вызовы методов плагина с максимальным покрытием функций, но и настроенные конфигурационные файлы для сборки по ОС Аврора. Наличие примера позволяет провести комплексную отладку и убедиться в корректности портирования.

Процесс тестирования с использованием примера включает в себя следующие этапы:

1. Отладка кода плагина — благодаря выполнению кода в debug режиме, появляется возможность использования штатных средств отладки Dart DevTools [12] для Dart кода, и gdb [13] для C++ кода.
2. Проверка конфигурационных файлов — сборка примера инициирует полный цикл компиляции плагина, что позволяет выявить ошибки в файлах конфигурации (.spec, .desktop). Успешная сборка и работа примера является индикатором того, настройка конфигурационных файлов выполнена верно.
3. Проверка стабильности в различных режимах исполнения — важным этапом является тестирование плагина во всех режимах работы Flutter-приложения, так как различные режимы сборки запускаются в различных режимах на ОС Аврора:
   - Debug — обеспечивает максимальную информативность для отладки, но запускается вне песочницы Аврора.
   - Release — проверяет работоспособность плагина в условиях итоговой компиляции и запускается в полноценной песочнице ОС Аврора.
4. Валидация на целевой аппаратной платформе — завершающим этапом является выполнение тестового примера на различных средах исполнения:
   - Эмулятор ОС Аврора — позволяет проверить сборку под архитектуру x86_64;
   - Физическое устройство — позволяет проверить сборку под архитектуры: armv7hl, arch64, а также протестировать плагин на физическом железе без эмуляции датчиков.

Таким образом, создание и всестороннее тестирование примера использования является не просто рекомендацией, а необходимым условием подтверждения качества портированного плагина перед его интеграцией в целевой проект.

Заключение

В данной статье на основе опыта и разработки Flutter плагинов для ОС Аврора была сформулирована методика портирования плагинов для ОС Аврора. Методика портирования, основанная на классификации архитектурных типов плагинов и анализе доступных на платформе Аврора API (Qt, D-Bus, нативные C++ библиотеки), предоставляет системный подход к портированию Flutter плагинов. Первый шаг данной методики заключается в анализе исходного кода плагина для: определения архитектуры, методов связи с нативным кодом, ограничений в Dart-коде. Следующий шаг составляет проведение анализа библиотек и API ОС Аврора и выбор использования: Qt API, D-Bus API, C++ API или Flutter Embedder; готовой собранной библиотеки, сборка собственной или зарос функционала у Открытой Мобильной Платформы. Третьим шагом методики является реализация плагина по выбранной архитектуре и с использованием проанализированных API или библиотек, и правильная подготовка конфигурационных файлов для корректной работы плагина. Финальным шагом методики является тестирование API плагина и настройки конфигурационных файлов посредством создания тестового приложения-примера, тестирование необходимо провести в различных режима и по возможности с использование физических устройств.

Применение данной методики позволяет существенно сократить трудоемкость адаптации, обеспечивая корректную работу плагинов на целевом устройстве, что вносит значимый вклад в расширение экосистемы отечественной мобильной платформы и ускорение миграции приложений на российское ПО.

Список литературы:

1. Federated plugin implementations URL: https://docs.google.com/document/d/1LD7QjmzJZLCopUrFAAE98wOUQpjmguyGTN2wd_89Srs/edit?tab=t.0#heading=h.pub7jnop54q0
2. FFI package. URL: https://pub.dev/packages/ffi
3. Aurora public API. URL: https://developer.auroraos.ru/doc/software_development/reference/public_api
4. Aurora D-Bus API. URL: https://developer.auroraos.ru/doc/software_development/reference/dbus_api
5. Aurora C++ API. URL: https://developer.auroraos.ru/doc/software_development/reference/cpp_api
6. Flutter Embedder for Aurora OS/ URL: https://developer.auroraos.ru/git/flutter/aurora-embedder
7. Aurora Platform SDK. URL: https://developer.auroraos.ru/doc/sdk/psdk
8. Dbus package. URL: https://pub.dev/packages/dbus
9. Qt D-Bus URL: https://doc.qt.io/qt-6/qtdbus-index.html
10. Aurora Desktop file. URL: https://developer.auroraos.ru/doc/software_development/guidelines/rpm_requirements/desktop_requirements
11. Aurora Spec file. URL: https://developer.auroraos.ru/doc/software_development/guidelines/rpm_requirements/spec_requirements
12. Flutter Dev Tools. URL: https://docs.flutter.dev/tools/devtools
13. GDB.URL: https://www.sourceware.org/gdb/
14. Dilkhaz Y. Mohammedand Siddeeq Y. Ameen, Developing Cross-Platform Library Using Flutter. URL: https://eu-opensci.org/index.php/ejeng/article/view/62740
15. Shivam Shashikant Marolikar , Ashok Yadav, Assessing The Stability and Quality of the Flutter Plugin Ecosystem, URL: https://ijirt.org/publishedpaper/IJIRT188822_PAPER.pdf
16. CompanionLink Blog. The Benefits of Using APIs in Mobile App Development URL: https://www.companionlink.com/blog/2021/02/the-benefits-of-using-apis-in-mobile-app-development/.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Погудалов Н.В., Вельдин Д.С., Коробов С.А., Лавровская А.Д., Стадник В.В., Глазунов В.А., Гостева И.В.

Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

В статье [1] обсуждаются сферические и эллипсоидные формы дендритного шипика, а также предполагаются нестационарные потоки сигнального соединения в границах клетки. Однако для случая сферы с симметричными граничными условиями в статье [1] не приведены графики, непосредственно иллюстрирующие реализацию аналитического решения, что затрудняет сравнение результатов аналитического и численного подходов.

Целью нашего исследования является анализ и реализация вывода с помощью Python и Julia, а также использование ChatGPT 5.4 Thinking для получения аналитического решения этой же задачи.

Основной текст

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial C}{\partial t} + \dfrac{C}{\tau} = D\nabla^2 C \\ D\nabla C\vec{n}\,|_{ER} = J_{ER}(t) = \varepsilon J_{PM}(t - t_{ER})\,H(t - t_{ER}) \\ D\nabla C\vec{n}\,|_{PM} = J_{PM}(t) = \gamma\left(e^{-\frac{t}{\alpha}} - e^{-\frac{t}{\beta}}\right) \\ C(t=0) = 0 \qquad\qquad r \in [R_i, R_o] \end{cases}$$

Получение аналитического решения подробно рассмотрено в работе в этом же сборнике [2]. Хотя итоговое решение имеет аналитический вид, в него входят интегралы, которые вычисляются численно. Для практической реализации аналитического решения были подготовлены две независимые программы – на ЯП Python и ЯП Julia. В обеих версиях использовалась одна и та же последовательность вычислений: поиск собственных значений, вычисление коэффициентов ряда, численное интегрирование и построение распределений концентрации. Основная цель такой реализации – проверить корректность получаемого решения и убедиться, что результаты, полученные на разных языках, совпадают с точностью до вычислительной погрешности.

Интегральные выражения вычислялись адаптивными квадратурными алгоритмами семейства Гаусса-Кронрода. В ЯП Julia в пакете QuadGK в функции quadgk используется пара правил Гаусса–Кронрода порядка 7/15: интеграл делится на интервалы, каждый из которых вычисляется по правилу Кронрода, затем так же на каждом интервале вычисляется погрешность по правилу Гаусса. Далее интервал с наибольшей ошибкой делится, и процесс повторяется до достижения заданной точности.

В ЯП Python в библиотеке scipy в модуле integrate в функции quad с параметрами по умолчанию для интеграла с конечными пределами и без разрывов используется процедура qagse из библиотеки QUADPACK [3]. В этом алгоритме область интегрирования также разбивается на подобласти, на каждой из них применяется 21-точечная квадратура Гаусса–Кронрода, а затем результат уточняется с контролем погрешности и экстраполяцией до достижения заданной точности.

Для решения характеристического уравнения (рис. 1) заданный диапазон собственных значений λ последовательно просматривался с определенным шагом, и на каждом промежутке проверялась смена знака функции. Если такая смена есть, значит внутри может находиться корень, который уточняется методом Брента [4].

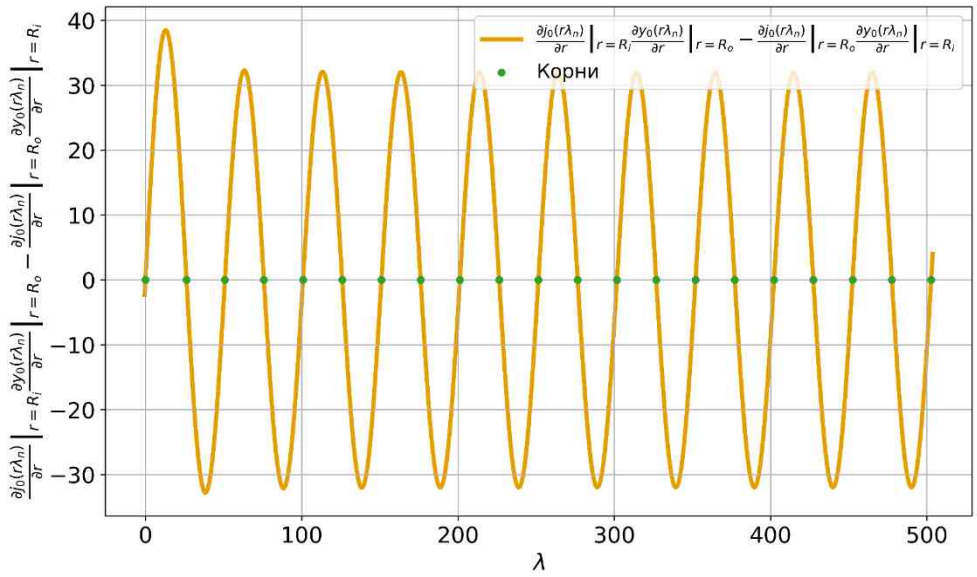


Рис. 1. Корни λ_n характеристического уравнения аналитического решения.

В численном анализе метод Брента представляет собой гибридный алгоритм поиска корня, сочетающий метод деления пополам, метод секущих и обратную квадратичную интерполяцию. Он обладает надежностью деления и одновременно отличается высокой скоростью вычисления.

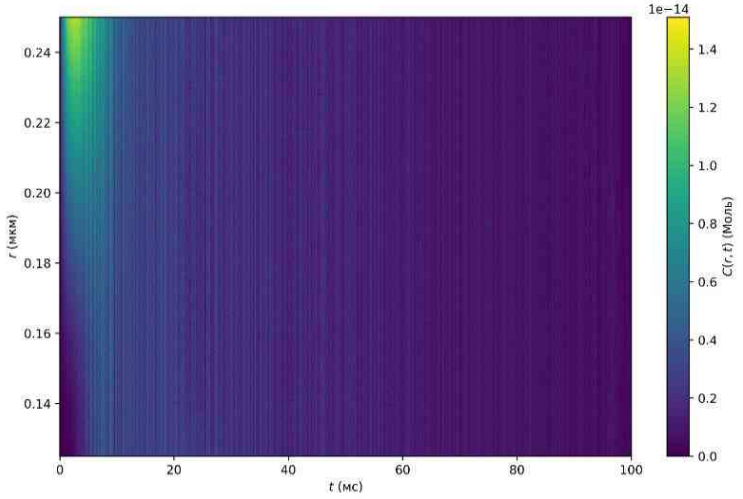


Рис. 2. Тепловая карта абсолютной разности Python и Julia.

Сопоставление результатов программных реализаций показало практически полное их совпадение (рис. 2). Тепловые карты функции *C(r,t)*, полученные на Python и Julia, визуально неразличимы; абсолютная разность между реализациями имеет порядок 10^{-14}. Это означает, что расхождения определяются не математической постановкой, а пределами машинной точности и особенностями вычислительных библиотек. Следовательно, построенное аналитическое решение корректно реализуется в обеих средах и может использоваться как эталон для последующих сравнений.

Отдельный этап работы был связан с применением ChatGPT 5.4 Thinking. Модели был передан детализированный промт, который был дополнительно доработан с использованием инструмента оптимизации промтов, включавший словесную постановку задачи, описание области, начального условия, граничных потоков, направлений внешних нормалей и требуемой структуры ответа. В результате была получена развернутая аналитическая схема решения, которая затем была перенесена в среду Julia и приведена к вычислительному виду с помощью

запроса представить результат в формате, удобном для переноса в статью и презентацию, адаптировать ответ в виде LaTeX-кода и алгоритма реализации.

ChatGPT предложил несколько иной вариант аналитического решения задачи. Для программной реализации этого решения потребовалось численно найти корни уравнения

$$tg\left(\mu_n\left(R_o-R_i\right)\right)=\frac{\mu_n\left(R_o-R_i\right)}{1+\mu_n R_i R_o}.$$

Поиск корней (рис. 3) был реализован с использованием того же метода, который использовался для полученного ранее аналитического решения с использованием метода Брента.

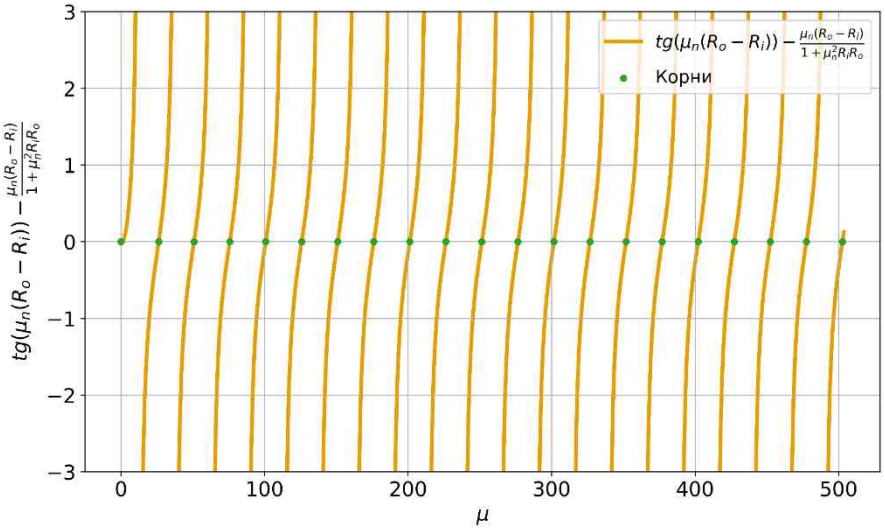


Рис. 3. Корни μ_n характеристического уравнения аналитического решения ChatGPT.

Сравнение с независимым аналитическим решением показало качественное совпадение пространственно-временной картины и хорошее количественное согласие: в контрольной точке расхождение имело порядок 10^{-4} (рис. 4). Этот результат важен как подтверждение того, что при корректной постановке задачи и экспертной проверке языковая модель может существенно ускорять подготовку аналитического вывода и программной реализации.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ показывает, что технологии ИИ целесообразно рассматривать как инструмент сопровождения исследования. Они упрощают формализацию постановки задачи, помогают получить компактное аналитическое представление решения и ускоряют подготовку программного кода, но не заменяют математический контроль, проверку граничных условий, анализ асимптотики и прямое сравнение с независимой реализацией.

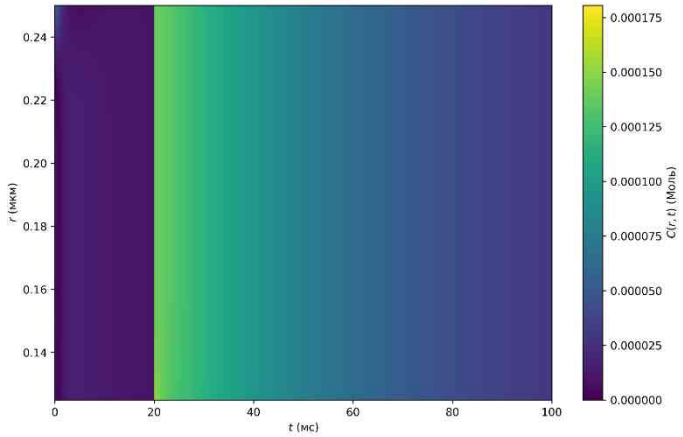


Рис. 4. Тепловая карта абсолютной разности решения Julia и ChatGPT.

Заключение

В работе исследована задача диффузии в сферическом слое с зависящими от времени граничными условиями, возникающая при моделировании сигнализации в дендритном шипике: построено аналитическое решение, выполнена его независимая реализация на Python и Julia и проведено сравнение вычислительных результатов.

Показано, что две программные реализации совпадают с точностью порядка машинного нуля, а решение, полученное с использованием ChatGPT 5.4 Thinking и затем перенесенное в вычислительную среду, корректно воспроизводит искомую динамику после экспертной верификации. Следовательно, при грамотной постановке задачи, внимательной проверке промежуточных преобразований и корректной интерпретации результатов ChatGPT может успешно применяться для решения рассматриваемого класса задач математической физики – в частности, задачи диффузии в сферическом слое с нестационарными граничными условиями.

Список литературы:

1. Cugno A., Bartol T.M., Sejnowski T.J., Iyengar R., Rangamani P. Geometric principles of second messenger dynamics in dendritic spines // 2019 Scientific Reports, 9, 11676.
2. Вельдин Д.С., Коробов С.А., Лавровская А.Д., Погудалов Н.В., Стадник В.В., Глазунов В.А., Гостева И.В. Верификация численного решения задачи диффузии в дендритном шипике сферической формы // 2026 Сборник докладов XX Всероссийской молодежной научной школы-конференции «Математика и математическое моделирование».
3. Piessens R., de Doncker-Kapenga E., Uberhuber C.W., Kahaner D.K. QUADPACK: A Subroutine Package for Automatic Integration // 1983 Berlin; Heidelberg: Springer.
4. Brent R.P. Algorithms for Minimization without Derivatives // 1973 Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

ПОСТРОЕНИЕ СРЕДИННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕТРАЭДРАЛЬНЫХ СЕТОК ДЕЛОНЕ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ

Гурьев В.В[1,2]

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва,*
[2]*Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Сарове, г. Саров*

Срединные поверхности тонкостенных тел широко используются в задачах конечно-элементного анализа, редукции размерности геометрических моделей и автоматизации инженерных процедур в САПР [4,5,6]. Их применение позволяет заменить объёмное представление конструкции поверхностным, что особенно важно при моделировании тонкостенных элементов с использованием теории пластин и оболочек. При этом в инженерных постановках обычно требуется не столько строгая медиальная ось, сколько устойчивая и топологически корректная срединная поверхность, согласованная с геометрией изделия и пригодная для дальнейшего построения расчётных и САПР-моделей.

Известные подходы к построению срединных линий и поверхностей включают медиальные оси (MAT), хордальное осевое преобразование (CAT), методы утончения и алгоритмы попарного сопоставления противоположных участков поверхности [1,2,3,5]. Однако классические медиальные представления чувствительны к малым возмущениям границы и нередко порождают паразитные ветвления, требующие дополнительной фильтрации [1,2]. Методы, ориентированные на пары САПР-поверхностей, хорошо работают в специальных постановках, но хуже переносятся на случай произвольной входной триангуляции [4,5]. Поэтому актуальной является разработка алгоритма, принимающего на вход замкнутую поверхностную триангуляцию и строящего устойчивую срединную поверхность, пригодную для инженерных приложений.

В работе рассматривается алгоритм построения срединной поверхности по поверхностной триангуляции замкнутого тела. На первом этапе по входной поверхности строится тетраэдральная сетка Делоне с ограничениями с использованием библиотеки TetGen с сохранением исходных граничных граней и без добавления внутренних точек [7]. Далее для каждого тетраэдра определяется число граничных граней и граничных рёбер, что позволяет разделить элементы на внутренние, полуграничные и граничные. Такая классификация задаёт исходную структуру для последующего выделения устойчивого фрагмента срединной поверхности.

Одним из этапов алгоритма является фильтрация тетраэдров по критерию глубины. Для тетраэдра K с вершинами $\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ рассматривается центр его описанной сферы C. Если $C \in K$, тетраэдр считается достаточно глубоким. В противном случае используется угловая мера

$$\mu(K) = \max_{i \neq j} \arccos \frac{(v_i - C) \cdot (v_j - C)}{|v_i - C| \cdot |v_j - C|}.$$

Эта величина позволяет отсекать мелкие и плоские тетраэдры, расположенные вблизи границы. Затем выполняется итеративная фильтрация: неглубокие тетраэдры с двумя и более граничными гранями деактивируются, а информация о граничности граней и рёбер обновляется. В результате формируется подмножество «глубоких» тетраэдров, задающее устойчивое приближение внутренней структуры тонкостенного тела.

Построение срединной поверхности выполняется в два шага. Сначала обрабатываются базовые конфигурации. В одном из базовых случаев по срединам соответствующих рёбер тетраэдра строится четырёхугольный фрагмент срединной поверхности; в другом базовом случае строится треугольный фрагмент. После этого выполняется интерполяция/экстраполяция краевых участков: рассматриваются тетраэдры, не попавшие в базовые случаи, но расположенные на границе уже построенной поверхности. Для них анализируется конфигурация разрезанных рёбер и локальное окружение, что позволяет достраивать недостающие треугольные и четырёхугольные фрагменты и уменьшать число топологических разрывов.

В качестве демонстрационных примеров рассматриваются задачи деформации трёхмерной пластины, в которых исходная конфигурация подвергается пространственному изгибу и закручиванию. Анализируется поведение срединной поверхности при сложных геометрических преобразованиях, а также оценивается устойчивость алгоритма к искажениям формы.

Рассматриваются два типа деформаций: гладкая криволинейная деформация пластины и пространственное закручивание. Для каждого случая строится срединная поверхность, позволяющая оценить корректность восстановления внутренней структуры объекта и согласованность с геометрией исходного тела.

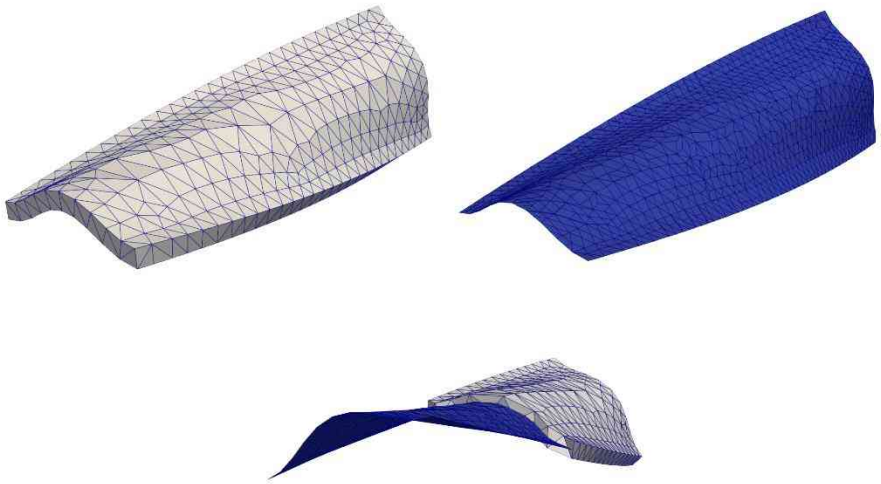


Рис. 1. Срединная поверхность криволинейно деформированной пластины

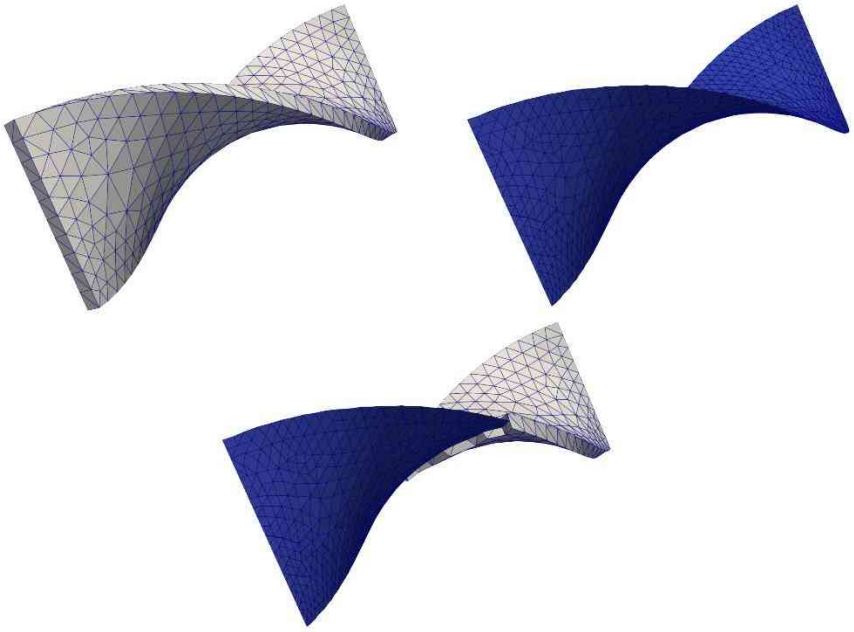


Рис. 2. Срединная поверхность закрученной пластины

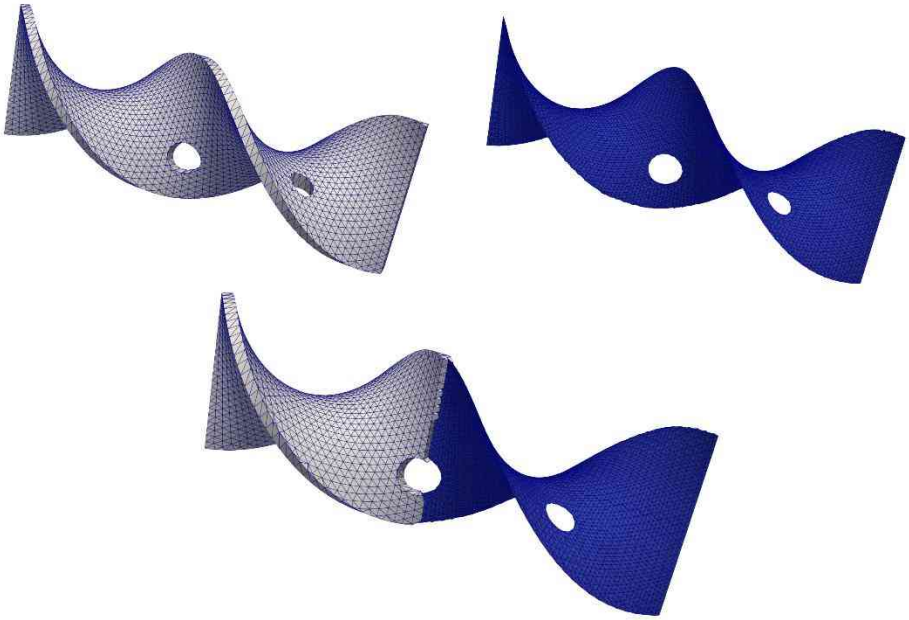


Рис. 3. Срединная поверхность закрученной пластины (альтернативный вариант)

Эксперименты показывают, что предложенный подход сохраняет топологическую целостность поверхности и корректно отражает внутреннюю структуру тонкостенного тела. В дальнейшем предполагается улучшить обработку краевых зон, а также рассмотреть случаи пересечения и сопряжения срединных поверхностей для геометрически сложных тел.

Автор выражает благодарность Л.Н. Кудрявцевой за постановку задачи и помощь в работе.

Список литературы:

1. Blum H. A transformation for extracting new descriptors of shape // Models for the Perception of Speech and Visual Form. Cambridge, MA: MIT Press, 1967. P. 362–380.

2. Prasad L. Rectification of the chordal axis transform skeleton and criteria for shape decomposition // Image and Vision Computing. 2007. Vol. 25, No. 10. P. 1557–1571.
3. Lam L., Lee S.-W., Suen C. Y. Thinning methodologies: a comprehensive survey // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. Vol. 14, No. 9. P. 869–885.
4. Rezayat M. Midsurface abstraction from 3D solid models: general theory, applications // Computer-Aided Design. 1996. Vol. 28. P. 905–915.
5. Woo Y. Abstraction of mid-surfaces from solid models of thin-walled parts: a divide-and-conquer approach // Computer-Aided Design. 2014. Vol. 47. P. 1–11.
6. Sheen D.-P., Son T.-g., Ryu C., Lee S. H., Lee K. Dimension reduction of solid models by mid-surface generation // International Journal of CAD/CAM. 2009. Vol. 7, No. 1. P. 71–80.
7. Si H. TetGen, a Delaunay-based quality tetrahedral mesh generator // ACM Transactions on Mathematical Software. 2015. Vol. 41, No. 2. P. 1–36.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОГЛОЩАЮЩИХ, РАССЕИВАЮЩИХ И ИЗЛУЧАЮЩИХ СРЕДАХ В «ЛОГОС ТЕПЛО»

Власов Н.С.
Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Моделирование распространения излучения находит широкое применение при оценке теплового состояния различных конструкций во многих областях науки и техники, например, в металлургии, космической отрасли, оптики и плазменных технологиях.

В текущей версии модуля «Логос Тепло» пакета программ «Логос» реализована возможность определения теплового состояния тел с учетом теплообмена излучением между поверхностями. Реализованная методика основана на наличии между поверхностями вакуумной области, не взаимодействующей с излучением. Учёт процессов поглощения и рассеяния излучения, а также испускания излучения самой средой в таких областях позволит расширить функциональные возможности «Логос Тепло» в части моделирования теплообмена излучением.

Основная часть

Номенклатура

C_V	удельная теплоемкость…. $\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{К}$	*Греческие символы*	
T	температура…….……К	χ	теплопроводность…… $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}$
t	время…….....с	ρ	плотность…… $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$
Q	мощность источников……..... $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}$	κ_a	коэффициент поглощения……. м^{-1}
x, y	Декартовы координаты	σ_s	коэффициент рассеяния..…….. м^{-1}
$\vec{q}_R$	радиационный тепловой поток.. $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$	σ	постоянная Стефана-Больцмана
G	интегральный поток……... $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$	$\vec{\Omega}$	направление движения фотонов
I	интенсивность……..... $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1}$	α	коэффициент ослабления…..... м^{-1}
c	скорость света…… $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$	γ	весовой коэффициент
Φ	индикатриса рассеяния……..... ср^{-1}	ε	степень черноты стенки
$\vec{n}$	единичный внешний вектор нормали	ω	альбедо рассеяния
A	площадь грани …….……... м^2	*Нижние индексы*	
q_r	мощность источников……..... $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}$	a	absoption
S^l	внутренние источники….. $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{ср}^{-1}$	s	scattering
$\overline{I^l_{out}}$	средняя исходящая интенсивность …….. $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1}$	k	связано с k-м дискретным направлением угловой квадратуры
$\overline{I^l_{in}}$	средняя входящая интенсивность …….…… $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1}$	0	связано со значением на предыдущий момент времени

L	общее число дискретных направлений	j	связано с j-й гранью ячейки
V	объем..... м^3	b	абсолютно черное тело
w	вес дискретного направления	r	radiative
D	матрица СЛАУ диффузии	P	связано с центром ячейки
b	правая часть СЛАУ диффузии	ref	эталонное значение
N	кондукционно-радиационный параметр		

Верхние индексы

l	связано с l-м дискретным направлением угловой квадратуры
n	связано с n-й итерацией СЛАУ диффузии

Теплоперенос в твердотельных областях B с границей ∂B описывается уравнением теплопроводности [6], которое при моделировании в той же области процессов переноса излучения приобретает вид [4]:

$$\frac{\partial(\rho C_V T)}{\partial t} = div(\chi \cdot grad(T)) + div\left(\vec{q}_R\right) + Q,\ T = T(x,y),\ (x,y) \in B.. \tag{1.1}$$

Уравнение (1.1) дополняется начальными и граничными условиями. В качестве начальных условий задаётся начальная температура, в качестве граничных: фиксированная температура, тепловой поток, конвективный теплообмен, излучение или комбинация ранее перечисленных граничных условий.

Дивергенция радиационного теплового потока в (1.1) имеет вид:

$$Q_r = div\left(\vec{q}_R\right) = \kappa_a (G - 4\sigma T^4). \tag{1.2}$$

Если такая область B граничит с некоторой областью C, где моделируются только процессы теплопроводности, то для области C на контакте с областью B необходимо задать граничное условие второго рода.

Радиационный тепловой поток определяется с помощью интенсивности излучения, определение которой сводится к решению уравнения переноса излучения, которое для некоторой области E имеет вид [2,4]:

$$\frac{1}{c}\frac{\partial I(\vec{\Omega})}{\partial t} + \vec{\Omega}\nabla I(\vec{\Omega}) = -\alpha \cdot I(\vec{\Omega}) + \kappa_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi}\int_{4\pi} I(\vec{\Omega}')\Phi(\vec{\Omega},\vec{\Omega}')d\Omega' + \frac{q_r}{4\pi}, \tag{1.3}$$
$$I = I(x,y),\ (x,y) \in E.$$

Уравнение (1.3) дополняется начальными и граничными условиями. В качестве начальных условий задаётся начальная температура и начальная интенсивность, а в качестве граничных: падающая интенсивность и отражающая стенка.

Введем обозначение:

$$S^l = \kappa_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi}\int_{4\pi} I(\vec{\Omega}')\Phi(\vec{\Omega},\vec{\Omega}')d\Omega' + \frac{q_r}{4\pi}. \tag{1.4}$$

Уравнение (1.3) можно решить различными численными методами, однако наиболее универсальным является метод дискретных ординат [2], при котором для уравнения переноса излучения выполняется угловая и пространственная дискретизация, после выполнения которых уравнение (1.3) примет вид [3,7]:

$$\sum_{j=1}^{J} I_j^l \cdot (\vec{\Omega}_l, \vec{n}_j) \cdot A_j = -\alpha \cdot I_P^l \cdot V + S^l \cdot V - \frac{1}{c}\frac{I_P^l - I_{P,0}^l}{\Delta t} V. \tag{1.5}$$

Неизвестные значения исходящих интенсивностей из (1.5) можно исключить, используя монотонную схему с весами [4]:

$$I_P^l = \gamma \overline{I_{out}^l} + (1-\gamma)\overline{I_{in}^l}. \tag{1.6}$$

Выражая среднюю исходящую интенсивность $\overline{I_{out}^l}$ из (1.6) и подставляя в (1.5), получаем итерационную формулу [3, 7]:

$$I_P^l = \frac{\gamma \cdot \left(I_{P,0}^l \Big/ c \cdot \Delta t + S^l \right) \cdot V + (1-\gamma)\overline{I_{in}^l} \sum\limits_{j:(\vec{\Omega}_l \cdot \vec{n}_j)>0} (\vec{\Omega}_l, \vec{n}_j) A_j - \gamma \sum\limits_{j:(\vec{\Omega}_l \cdot \vec{n}_j)<0} I_j^l (\vec{\Omega}_l, \vec{n}_j) A_j}{\gamma \left(1 \Big/ c \cdot \Delta t \right) \cdot V + \gamma \cdot \alpha \cdot V + \sum\limits_{j:(\vec{\Omega}_l \cdot \vec{n}_j)>0} (\vec{\Omega}_l, \vec{n}_j) A_j}. \tag{1.7}$$

После определения интенсивности в центре каждой ячейки для каждого направления по (1.7), можно определить интегральный поток *G* входящий в (1.2):

$$G = \int\limits_{4\pi} I(\vec{\Omega}) d\Omega \approx \sum_{l=1}^{L} w^l I(\vec{\Omega}^l). \tag{1.8}$$

Аппроксимация уравнения теплопроводности «Логос Тепло» расписана относительно приращения температуры:

$$D\Delta T = b - DT^n. \tag{1.9}$$

Поэтому выражение (1.2) необходимо представить линейно относительно ΔT, для этого выполняется разложение температуры в ряд Тейлора и (1.2) в результате преобразований приобретает вид:

$$Q_r = \kappa_a (G - 4\sigma \left(T^n \right)^4) - 16\kappa_a \sigma \left(T^n \right)^3 \Delta T. \tag{1.10}$$

Коэффициент $16\kappa_a \sigma \left(T^n \right)^3$ из (1.10) добавляется в матрицу *D* СЛАУ диффузии, а оставшаяся часть выражения добавляется в правую часть *b* СЛАУ диффузии.

Верификационные расчеты

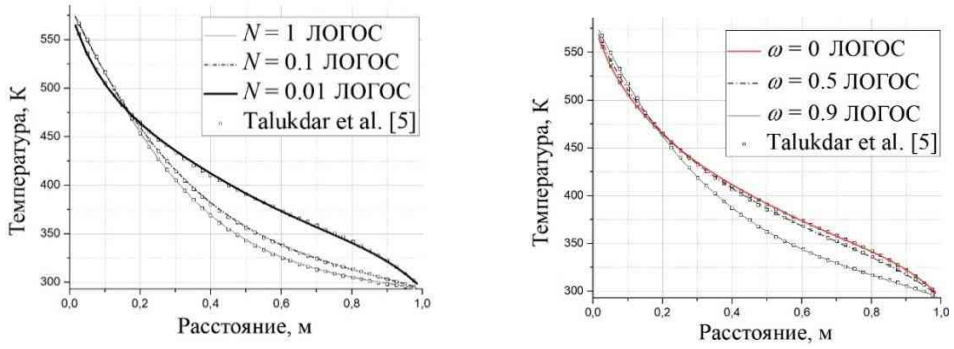
Рассматривается тестовая задача моделирования теплового состояния единичного куба, заполненного веществом, внутри которого моделируются процессы переноса излучения. Постановка задачи приведена в работе [5].

Кондукционно-радиационный параметр в работе [5] имеет вид:

$$N = \frac{\alpha \chi}{4\sigma T_{ref}^3}. \tag{1.11}$$

Для численного моделирования значение T_{ref} принимается равным 586 К.

На рисунке 1 представлены полученные профили температур для рассматриваемой задачи при расчетах с различными *N*, ω.



а. б.

Рисунок 1 – Профили температур теплового состояния кубической области тестовой задачи: а - профили температур при расчетах с фиксированными $\alpha = 1$, $\sigma_s = 0$ и различным N; б – профили температур при расчетах с фиксированными $\alpha = 1$, $N = 0.01$ и различным ω

Максимальные относительные отклонения всех расчетов не превышают 1.5%.

Заключение

Выполнена разработка и реализация в «Логос Тепло» численного метода решения связанных задач теплопроводности и теплообмена излучением с учетом процессов поглощения и рассеяния излучения, а также испускания излучения самой средой. Методика расширяет возможности использования программного модуля «Логос Тепло», позволяя с высокой точностью моделировать тепловые процессы с учетом поглощения, рассеяния и испускания излучения.

Список литературы:

1. Пакет программ «Логос» [Электронный ресурс]: – режим доступа: http://logos.vniief.ru/products/logos;
2. Modest M.F. Radiative Heat Transfer, 3th Edition – 2013. – 951c.
3. D Joseph, Mouna El-Hafi, Richard A Fournier, B Cuenot. Comparison of three spatial differencing schemes in discrete ordinates method using three-dimensional unstructured meshes. HAL open science journal. 2018 [Электронный ресурс]: – режим доступа: http://hal.science/hal-01712158v1;
4. J.M. Zhao, L.H. Liu. Radiative Transfer Equation and Solutions. Harbin Institute of Technology, China. 2017 [Электронный ресурс]: – режим доступа: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-32003-8_56-1;
5. Talukdar P., Issendorff F. V., Trimis D., Simonson C. J. Conduction–radiation interaction in 3D irregular enclosures using the finite volume method, Heat Mass Transfer 2008;44:695-704.
6. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. гл. III, § 1.
7. Zhixiong Guo, Zhixiong Guo. Three-Dimensional Discrete Ordinates Method in Transient Radiative Transfer. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 16, No. 3 – 2002.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБУЧАЕМОГО РАНЖИРОВАНИЯ

Афонина Д.С.
Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Саров

Современные методы обработки естественного языка активно используют большие языковые модели, которые обеспечивают высокое качество генерации текста и анализа документов. Однако эффективность таких моделей для задач информационного поиска ограничена: модели опираются на статические параметрические знания и не имеют доступа к актуальной или узкоспециализированной информации [1]. Более того, качество поиска напрямую зависит от того, на каких данных обучалась модель, поскольку векторные представления информации (эмбеддинги) формируются на основе обучающей выборки, где может отсутствовать нужная терминология, характерная для технических документов.

Для повышения точности информационного поиска применяются гибридные архитектуры, объединяющие генеративные модели с системами поиска [2]. Однако их эффективность в значительной степени определяется качеством этапа извлечения информации. Базовые методы поиска недостаточно хорошо учитывают контекст запроса и чувствительны к формулировкам. Особенно остро это проявляется при работе с технической документацией. Для решения данной проблемы предлагается использовать двухэтапную архитектуру «извлечение – повторное ранжирование», где на первом этапе формируется набор кандидатов, а на втором – уточняется порядок их релевантности. Задача информационного поиска в технической документации особенно сложна из-за плотной специализированной терминологии. Ошибки на этапе извлечения кандидатов приводят к снижению точности всей системы.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная оценка методов машинного обучения для задачи обучаемого ранжирования и ансамбля моделей для повышения точности информационного поиска в технической документации. В предлагаемой архитектуре первый этап основан на семантическом поиске с использованием эмбеддингов. Для каждого запроса формируется набор кандидатов по косинусному сходству. На втором этапе выполняется повторное ранжирование с помощью моделей машинного обучения. Признаковое пространство включает три группы признаков:

— семантические признаки, основанные на операциях разности и произведения эмбеддингов запроса и документа, учитывающие скрытые смысловые зависимости;

— текстовые признаки, отражающие значимость терминов и специфику технической документации;

— комбинированные признаки, объединяющие семантические и статистические подходы.

Для обучения моделей использовались логистическая регрессия, случайный лес, градиентный бустинг и многослойный перцептрон. Для дальнейшего повышения точности предложен ансамбль Брэдли-Терри. В работе рассматривается:

— разнородный ансамбль, агрегирующий результаты обученных моделей;

— однородный ансамбль нейронных сетей, объединяющий предсказания нескольких однотипных моделей с различной начальной инициализацией (данный подход обеспечивает быстрое выполнение, так как внутри ансамбля нет тяжеловесных деревьев).

Эксперимент проводился на корпусе документации к специализированному программному обеспечению, содержащем текстовые фрагменты и пользовательские вопросы. Метрики оценки – ROC-AUC@top-1, MRR@k, и NDCG@k – измерялись при разных значениях k.

Результаты показали, что использование только семантических признаков ограничено для базовых моделей, но обучение с учителем позволяет значительно повысить метрики. Текстовые признаки эффективны для линейных моделей и вносят значимый вклад в точность ранжирования. Наилучшие результаты достигаются при комбинировании семантических и текстовых признаков.

Базовый этап извлечения на основе косинусного сходства показал следующие результаты: MRR@3 = 0.6040, NDCG@3 = 0.7077 и ROC-AUC@top-1 = 0.6863. Наилучшие результаты среди отдельных моделей продемонстрировали многослойный перцептрон и случайный лес (MRR@3 = 0.9093, NDCG@3 = 0.9330). Значения ROC-AUC@top-1 для этих моделей также остаются высокими: 0.7999 для многослойного перцептрона и 0.7929 для случайного леса. Это свидетельствует о высокой способности моделей машинного обучения корректно ранжировать релевантные текстовые фрагменты в верхней части списка.

Применение ансамбля дополнительно повышает устойчивость результатов. Разнородный ансамбль Брэдли–Терри демонстрирует улучшение по сравнению с базовым методом (MRR@3 = 0.8916, NDCG@3 = 0.9200), тогда как однородный ансамбль нейронных сетей (MRR@3 = 0.9115, NDCG@3 = 0.9347) показывает наилучшие значения метрик, превосходя как отдельные модели, так и разнородный ансамбль.

Таким образом, двухэтапная архитектура «извлечение – обучаемое ранжирование» с комбинированным признаковым пространством и ансамблем Брэдли-Терри позволяет существенно повысить точность информационного поиска в технической документации. Полученные результаты могут быть применены при разработке интеллектуальных систем поиска для больших специализированных корпусов документов.

Список литературы:
1. Lewis P., Perez E., Piktus A. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Vol. 33. – P. 9459–9474.
2. Manning C.D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – P. 109–133.

АРХИТЕКТУРА ИНТЕГРАЦИИ АППАРАТНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИИ В СРЕДЕ ROS

Добровольский В.А., Ерохина Д.А.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В современной робототехнике выделяют два основных подхода к управлению: системы с жёстко заданными алгоритмами/логикой и системы с облачной архитектурой.

Если рассматривать в качестве примера конвейерное производство в автомобильной промышленности, то отчётливо можно увидеть, что за каждой единицей оборудования закреплена конкретная задача: сборка, пайка, покраска и так далее. Подобные комплексы представляют собой детерминированную систему, т.е. систему, выходы которой однозначно определяются управляющими воздействиями. Такие системы характеризуются тем, что при фиксированном наборе входных данных всегда получается один и тот же результат.

Альтернативным подходом являются системы с облачной архитектурой. В них вычислительные ресурсы предоставляются пользователю как сервис через сеть Интернет, а их обработка происходит на удаленных серверах. Они обеспечивают доступ к различным сервисам и инфраструктуре без необходимости покупки физического оборудования. К таким системам относится весь широкий спектр устройств IoT: от бытовых интеллектуальных систем (умные колонки, телевизоры, пылесосы и так далее) до устройств, выполняющих промышленные задачи[3].

Ключевые преимущества облачных технологий включают гибкость, доступность и экономию на затратах на оборудование и обслуживание. Однако у таких систем есть и ряд недостатков. Наиболее важный – латентность (latency) – временная задержка между отправкой пакета и получением ответа от сервера.

Проблема задержек особенно остро проявляется в системах дистанционного управления на большом расстоянии. К примеру, среднее расстояние между Землёй и Марсом около 225 млн км. Задержка сигнала для роботизированных исследовательских устройств (марсоходов) может достигать 1500 – 5000 секунд, что очень затрудняет управление ими в режиме реального времени.

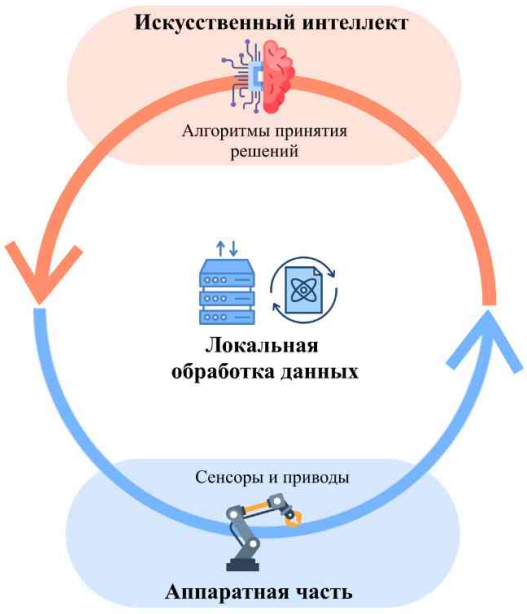


Рис. 1. Адаптивные киберфизические системы (КФС)

Для решения этих проблем необходим переход к адаптивным системам т.е. способным гибко приспосабливаться к изменениям, эффективно реагировать на новые условия и действовать в условиях неопределённости на основе локального принятия решений.

Основной целью данной работы является объединение искусственного интеллекта и аппаратной части в единый контур управления. Это позволит реализовать концепцию киберфизических систем (КФС) (рис. 1) - информационно-технологическую концепцию, которая объединяет вычислительные ресурсы с физическими объектами и процессами. Такая система будет фактически автономной, т.к. обработка данных будет происходить непосредственно на самом устройстве, что минимизирует зависимость от внешних серверов и сетевых задержек

В предлагаемой архитектуре управление робототехнической системой реализуется как замкнутый контур, в котором интеллектуальные алгоритмы напрямую участвуют в формировании управляющих воздействий. В качестве связующего слоя используется ROS как middleware технология, обеспечивающий единый интерфейс взаимодействия между сенсорными, вычислительными и исполнительными компонентами без привязки к конкретной реализации[1].

Ключевым отличием от классических подходов является перенос интеллектуальной обработки данных внутрь контура управления. Если в традиционных ROS пайплайнах данные сенсоров передаются в отдельный модуль обработки, а затем используются оператором или внешним алгоритмом, то в данном случае результаты работы ИИ непосредственно преобразуются в управляющие сигналы, замыкая цикл «восприятие–действие» в рамках одной системы.[4]

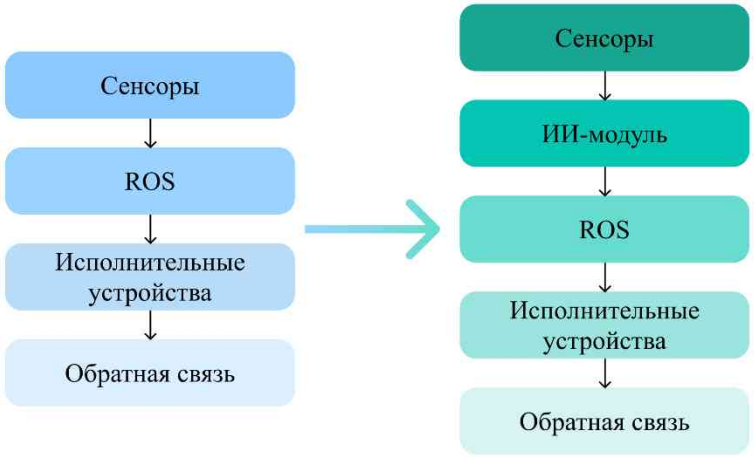


Рис. 2Концепция и структура архитектуры

Структурно архитектура представлена на рис. 2.

На уровне сенсоров формируется поток данных, например видеопоток с камеры, публикуемый в ROS-топик (например, /camera/image_raw). Данный поток подписывается интеллектуальным модулем, реализованным на Python, в котором происходит обработка изображения с использованием нейросетевой модели.

В рамках текущей реализации используется алгоритм слежения за человеком, где ключевым параметром является ошибка положения цели относительно центра кадра. Интеллектуальный модуль вычисляет управляющие параметры, например[2]:

- смещение по горизонтали (ошибка X),
- оценку расстояния до цели,
- необходимость поворота или движения.

Эти параметры интерпретируются как управляющие воздействия и публикуются в управляющий топик (например, /cmd_vel), который является стандартным интерфейсом для управления мобильной платформой. Таким образом, ИИ выступает активным элементом системы управления.[4]

Далее, ROS в режиме middleware, публикует управляющие команды исполнительным устройствам, где происходит преобразование абстрактных команд (скорость, направление) в конкретные сигналы для моторов. После выполнения действия система получает новую сенсорную информацию, что замыкает цикл управления.

Важной особенностью архитектуры является наличие переключаемых режимов работы: ручного и автоматического. В ручном режиме управляющий топик заполняется командами от оператора (например, с пульта или интерфейса управления), тогда как в автоматическом режиме источником команд выступает интеллектуальный модуль. Переключение между режимами осуществляется на уровне логики управления, что позволяет гибко комбинировать автономность и контроль со стороны человека[1].

Важной особенностью данного подхода заключается в локальных вычислениях, без обращения к внешним сервисам. Это позволяет минимизировать задержки (latency), устранить зависимость от сетевой инфраструктуры и обеспечить устойчивость системы в условиях нестабильной связи. Такой подход особенно критичен для задач, где требуется мгновенная реакция на изменения окружающей среды.

Архитектура также допускает расширение до уровня распределённых систем. В текущей конфигурации система включает робот и управляющий компьютер, взаимодействующие через локальную сеть, однако при необходимости может быть добавлен

центральный узел, распределяющий задачи между несколькими устройствами. В этом случае ROS и middleware-подход сохраняют единый интерфейс взаимодействия, обеспечивая масштабируемость без изменения базовой логики системы[3].

С инженерной точки зрения, предложенная архитектура формирует условия интеграции, в которых ключевым является не конкретное устройство, а способ организации взаимодействия между компонентами. Это позволяет переносить архитектуру на различные платформы — от мобильных роботов до манипуляторов — без изменения принципов работы.

Однако следует учитывать ограничения. Основным из них является зависимость от вычислительных ресурсов: выполнение нейросетевых моделей в реальном времени требует достаточной производительности, особенно при локальной обработке. Кроме того, при увеличении числа компонентов возрастает сложность синхронизации и настройки системы, что отразится в распределённых конфигурациях.

Таким образом, предложенная архитектура представляет собой переход от классических ROS-пайплайнов к интегрированным системам. Это обеспечивает адаптивность, снижает задержки и открывает возможность построения масштабируемых робототехнических решений, функционирующих в реальном времени.

В качестве практической реализации предложенной архитектуры использована мобильная робототехническая платформа, построенная на базе двух вычислительных уровней: Raspberry Pi 4B в роли основного управляющего узла и Arduino Uno в роли низкоуровневого контроллера исполнительных устройств[3]. Такое разделение позволяет разграничить задачи обработки данных и прямого управления приводами, повышая устойчивость и предсказуемость системы.

Видеопоток формируется с помощью CSI-камеры, подключённой непосредственно к Raspberry Pi, что обеспечивает минимальные задержки при передаче данных и стабильную работу без использования внешних интерфейсов[3]. Получаемое изображение в реальном времени поступает в программный модуль обработки, реализованный на Python.

В качестве интеллектуального компонента используется нейросетевая модель YOLO8n, выполняющая детекцию объектов в кадре. На основе результатов детекции вычисляется положение целевого объекта относительно центра изображения. Ключевым параметром управления является ошибка по вертикальной оси, которая используется для формирования управляющего воздействия.

Логика управления реализована в виде двух режимов работы:

- ручной режим, в котором команды управления поступают от оператора;
- автоматический режим, реализующий слежение за объектом на основе визуальных данных.

В автоматическом режиме реализуется принцип, близкий к визуальному сервированию: система стремится минимизировать ошибку положения объекта в кадре, формируя команды движения (поворот, смещение) на основе текущего состояния сцены.

Сформированные управляющие команды передаются с Raspberry Pi на Arduino по последовательному интерфейсу. На стороне Arduino происходит преобразование этих команд в сигналы управления моторами через 4-канальный драйвер, обеспечивающий управление движением платформы. Таким образом реализуется разделение уровней: высокоуровневая логика и ИИ — на стороне Raspberry Pi, низкоуровневое управление — на стороне Arduino[2].

С точки зрения архитектурных принципов, данная реализация демонстрирует модульность системы: сенсорный, вычислительный и исполнительный уровни разделены и взаимодействуют через чётко определённые интерфейсы. Использование аппаратной абстракции позволяет заменять отдельные компоненты (например, камеру или платформу) без изменения общей логики работы системы.

Таким образом, представленная реализация подтверждает переносимость предложенной архитектуры: несмотря на конкретную аппаратную конфигурацию (Raspberry Pi, Arduino, CSI-камера), логика взаимодействия компонентов остаётся неизменной и может быть воспроизведена на других робототехнических устройствах.

Список литературы:

1. Практическая робототехника C++ и Raspberry Pi. Ллойд Бромабах, 2026 год
2. Мобильные роботы с искусственным интеллектом на базе Arduino. М.В.Момот, Ю.А.Винницкий, И.В.Шишигин, 2025 год
3. Arduino Uno и Raspberry Pi 4: от схемотехники к интернету вещей. С.Л.Макаров 2023 год

4. ROS 2. Программирование интеллектуальных роботов. Ху Чуньсюй, Ли Цяолун 2025 год
5. Основы STM32. Уоррен Грей, 2024 год

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ТЕСТИРОВАНИЮ ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ И РЕАЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕСТОВ

Кирсанов М.К.
ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

В жизненном цикле любого современного программного продукта неотъемлемую роль играет процесс тестирования. Без него невозможно обеспечить должное количество продукта и стабильность его работы. По этой причине происходит активное развитие данного направления, внедряется широкий спектр новых технологий, в частности автоматизированное тестирование. Данный подход представляет собой реализацию программного кода, который в точности и самостоятельно воспроизводит шаги по заданным сценариям тестирования, тем самым заменяя работу ручных тестировщиков [1].

К основным преимуществам автоматизированных тестов можно отнести следующие параметры:

- обеспечивают оперативную проверку программного продукта на каждой отдельной итерации разработки;
- обладают универсальностью при выпуске обновлений, ранее разработанные автоматизированные тесты после незначительного редактирования могут быть успешно применимы для проверки нового функционала;
- позволяют экономить рабочие часы как тестировщиков, так и разработчиков, если процесс тестирования охватывает наиболее ранние этапы разработки, так как данный подход исключает возможность накопления большого количества ошибок, требующих значительных трудозатрат для их исправления.

Благодаря тому, что тестирование ПО становится частью программирования, разработчики имеют возможность исправлять ошибки уже на начальной стадии разработки. Это позволяет сократить риск появления дефектов в готовом продукте. Если ошибки найдены на начальном уровне, разработчик может создать надежное программное обеспечение. Таким образом, чем раньше начинается процесс, тем раньше обнаруживаются ошибки и тем ниже стоимость их исправления.

Без надлежащей оценки производимое программное обеспечение может нанести существенный вред как пользователям, так и производителю, что определяет программу исследования. Хорошее и эффективное тестирование программы помогает повысить его безопасность. Верификация и валидация являются основными целями процесса. Тестирование программного обеспечения помогает не только обнаружить дефекты в программном обеспечении, но и определить его нужность для клиента. Таким образом, качественное и управляемое тестирование делает бизнес успешным и повышает доверие к компании.

Первоначально роль тестировщика в процессе разработки ПО сводили к оценке функционала на предрелизном этапе. Такой способ разработки называют линейным. Сегодня абсолютное большинство компаний используют гибкую разработку, когда тестировщик внедряется в команду с самого начала, что дает возможность специалисту иметь полное представление об изначальной стратегии и всесторонне проверять качество продукта, причем делать это многократно.

За первые полгода работы системы «СПЖЦ.Персонал» проведено вводное теоретическое исследование современных подходов в сфере тестирования для создания собственных автоматизированных тестов на основе Selenium Python для применения в разработке системы «СПЖЦ.Персонал». Работа включает в себя детальный анализ эффективности внедряемых автотестов, направленный на выявление возможностей дальнейшего развития данного направления и реализацию оптимизирующих решений.

В ходе исследования отдельное внимание уделялось внедрению в работу искусственного интеллекта и применению больших языковых моделей в закрытом контуре – данное направление является одним из наиболее эффективных на современном рынке автоматизированного тестирования.

Современные организации сталкиваются с необходимостью цифровой трансформации всех бизнес-процессов, включая управление персоналом. Большие языковые модели (БЯМ)

демонстрируют значительный потенциал для революционных изменений в области человеко-машинного взаимодействия. Исследования показывают, что использование БЯМ способно ускорить инновационные процессы на 15-30%, что делает их внедрение стратегически важным для повышения эффективности деятельности предприятий [2].

Особую значимость этот вопрос приобретает для систем управления персоналом (СУП) закрытого контура, где традиционные облачные решения неприменимы, а требования к информационной безопасности существенно выше. В таких условиях разработка специализированных решений на основе БЯМ становится не просто вопросом оптимизации процессов, а необходимостью для обеспечения технологического суверенитета.

Анализ текущего состояния систем управления персоналом в организациях закрытого типа выявляет ряд системных проблем. Современные СУП характеризуются чрезвычайно обширной документацией, включающей тысячи страниц регламентов, инструкций и методических указаний. Сотрудники часто тратят значительное время на поиск нужной информации, что снижает производительность труда и увеличивает операционные издержки. Существующие системы технической поддержки сталкиваются с рядом проблем: высокая нагрузка на специалистов поддержки, длительное время реакции на запросы, необходимость обработки однотипных вопросов, сложность масштабируемости услуг поддержки.

В свою очередь, для предприятий закрытого контура характерны особые требования:
- Недопустимость использования зарубежных сервисов;
- Необходимость локального развертывания всех систем;
- Обеспечение полного контроля над данными.

Как показано в сравнительном исследовании, использование зарубежных БЯМ в системах закрытого контура невозможно по соображениям информационной безопасности. Это создает возможность для разработки конкурентных отечественных импортонезависимых решений. Ключевыми требованиями таких решений являются:
- Возможность обучения на корпоративных данных;
- Интеграция с существующими системами безопасности
- Соответствие отраслевым стандартам и регламентам.

Внедрение БЯМ неизбежно вызывает сопротивление со стороны персонала, особенно специалистов технической поддержки. Для успешной реализации проекта необходимо разработать программу организационных изменений, включающую коммуникацию преимуществ новой системы для сотрудников, перераспределение функциональных обязанностей, программы переобучения и повышения квалификации.

Основное преимущество БЯМ заключается в возможности создания интеллектуальных интерфейсов для работы с корпоративной информацией. Чат-бот, опирающийся при создании ответа на документацию, может стать эффективным инструментом поддержки первой линии и помочь пользователям находить нужную информацию среди тысяч страниц, минимизируя время поиска и повышая удобство взаимодействия, сокращая трудозатраты технической поддержки.

Автоматизация обработки запросов сотрудников и внутреннего документооборота с помощью БЯМ, развернутой на защищенной инфраструктуре, минимизирует необходимость привлечения персонала к рутинным операциям, что критически важно при ограниченном кадровом составе и сложности его расширения. Наиболее значимый экономический эффект проявляется в области управления безопасностью: локализованная модель позволяет анализировать внутренние коммуникации, инструкции и нормативные документы предприятия для контроля их соответствия режимным требованиям, выявления потенциальных инцидентов и формирования персонализированных программ безопасности, что позволяет избежать множество издержек, связанных с утечкой информации или нарушением регламентов.

Таким образом, интеграция больших языковых моделей в системы управления персоналом закрытого контура представляет собой важное стратегическое направление цифровой трансформации предприятий, позволяет достичь значительных улучшений в работе пользователей, технических специалистов и организации в целом. Успешная реализация таких проектов требует комплексного подхода, учитывающего как технологические, так и организационные аспекты. К основным выводам исследования относятся:
- Определены ключевые метрики для оценки эффективности внедрения;
- Предложена методика управления организационными изменениями;
- Обоснована экономическая целесообразность реализации проекта.

Список литературы:
1. Рыжов С.А., Баринов Д.С., Горностаева Н.В., Кирсанов М.К. Сравнительный анализ возможностей зарубежных интеллектуальных чат-ботов с российскими аналогами // Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XIV Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – 10-12 апреля 2024 г. – Саров: изд. «Интерконтакт», 2024. – С.218-219.
2. Скворцова Н.А., Булатов И.И. Интеграция LLM в процессы разработки новых продуктов и инноваций // Экономика устойчивого развития. – Москва: Московский финансово-промышленный университет «Синергия», 2024. – С. 277-280.

РАЗРАБОТКА API ИНСТРУМЕНТА НА C++ ДЛЯ РАБОТЫ С КРИВЫМИ

Зыкова А.С., Стожаров О.Е., Данилкин В.В., Рыжов С.Н., Уразов А.В., Ганчук С.Н.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В условиях импортозамещения и необходимости обеспечения технологического суверенитета возрастает потребность в легковесных, встраиваемых компонентах для визуализации данных, которые могут быть интегрированы в существующие программные комплексы без использования тяжеловесных внешних зависимостей. Зарубежная библиотека matplotlib, являясь стандартом де-факто для визуализации на языке Python, обладает значительными накладными расходами при встраивании в нативные приложения на C++ с графическим интерфейсом на Qt [3].

Целью данной работы является создание специализированной библиотеки для построения графиков и визуализации математических функций, полностью написанной с нуля на C++ с использованием Qt и 2D-виджета. Ключевым требованием стала возможность отображения не только стандартных функций (полиномы, тригонометрия), но и NURBS-кривых (неоднородных рациональных B-сплайнов), широко используемых в САПР-системах для описания сложных форм [1]. Разработанная библиотека ориентирована на обеспечение полного контроля над процессом рендеринга изображений и получение практического опыта разработки приложения авторами статьи.

Постановка задачи

Основной задачей проекта являлась разработка кроссплатформенного модуля визуализации, способного заменить базовый функционал matplotlib в рамках настольных приложений [3]. Для достижения этой цели проект был декомпозирован на несколько ключевых этапов:

1. **Разработка системы координат и масштабирования:** Реализация механизма отображения математических координат на пиксельные координаты виджета с поддержкой панорамирования (pan) и масштабирования (zoom) [2].
2. **Построение графиков функций:** Реализация парсера математических выражений и алгоритма дискретизации функций одной переменной $y = f(x)$ [2].
3. **Реализация алгоритмов NURBS:** Создание классов для работы с кривыми NURBS, включая вычисление базисных функций, точек на кривой и визуализацию контрольного многоугольника [1].
4. **Разработка архитектуры отрисовки:** Интеграция с Qt и использование **QGraphicsView** для высокопроизводительной отрисовки 2D-примитивов, а также реализация системы слоев для отображения подписей осей, легенды и самих кривых.
5. **Создание пользовательского интерфейса:** Разработка настраиваемого виджета, который можно встраивать в Qt-приложения аналогично обычным виджетам.

Реализация модуля визуализации

Разработка библиотеки велась на языке C++17 с использованием фреймворка Qt (6.9.3). В качестве основы для отрисовки был выбран класс **QGraphicsView** и его архитектура на основе сцены (QGraphicsScene), что позволило эффективно управлять большим количеством графических примитивов и обеспечить высокую интерактивность. Ключевой особенностью реализации стал переход от пиксельных координат экрана к математической системе координат с сохранением соотношения сторон и поддержкой динамического масштабирования и перемещения [2].

В процессе разработки были выделены следующие основные компоненты (см. диаграмму классов на рисунке 1):

- **PlotAPI** — основной виджет, наследующий QGraphicsView. Отвечает за обработку событий мыши (масштабирование колесом, панорамирование, выделение), управление сценой, переключение режимов отображения и взаимодействие с пользователем.
- **PlotInteraction** — вспомогательный слой, наследующий QGraphicsRectItem. Принимает события мыши и генерирует сигналы о перемещении, масштабировании и добавлении точек. Обеспечивает интерактивность графика.
- **Function** — класс для отображения графиков функций и наборов точек. Содержит преобразование логических координат в пиксельные, поддерживает режимы отображения: линия, точки, пунктир.
- **Generator** — вычислительное ядро библиотеки. Отвечает за хранение контрольных точек, вычисление NURBS‑кривых, генерацию массивов координат (NumpyC) и создание объектов Function. Реализует пересчёт кривой в реальном времени.
- **Curve**, **CalcCurve** и **CurvePoint** — математические классы, реализующие алгоритм Кокса–де Бура, вычисление базисных функций, производных и точек NURBS‑кривой. Обеспечивают независимость от внешних библиотек.
- **AxisItem** — класс для отрисовки осей координат, делений, подписей и сетки. Поддерживает динамическое масштабирование, панорамирование и адаптивное форматирование значений.
- **Legend** — элемент интерфейса, отображающий легенду графиков с цветами и подписями.
- **Bottom** — настраиваемые графические кнопки, используемые для управления режимами отображения, добавления точек, очистки сцены, загрузки и сохранения данных.

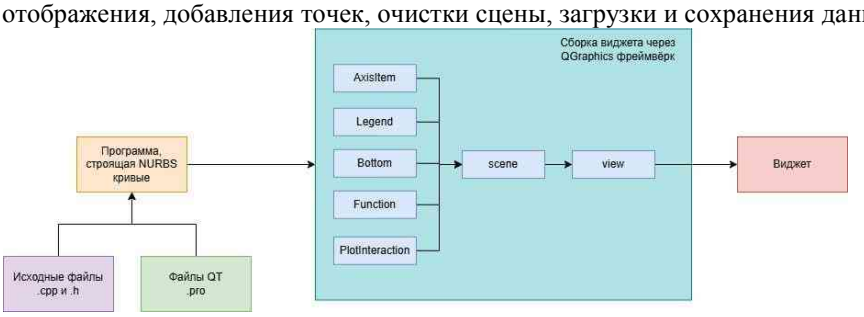


Рис. 1. Диаграмма классов библиотеки

На рисунке 2 представлена схема работы приложения. При добавлении новой функции или кривой происходит следующий процесс:

1. **Пользователь задаёт данные** — вводит математическую функцию, добавляет контрольные точки или загружает их из файла.
2. **Generator пересчитывает геометрию**: – формирует или обновляет узловой вектор; – вычисляет базисные функции и точки кривой по алгоритму Кокса–де Бура; – генерирует массивы координат в формате NumpyC.
3. **Создаются графические объекты Function**, отображающие: – основную кривую, – контрольный многоугольник, – пунктирную аппроксимацию (если включена).
4. **PlotAPI обновляет логический и пиксельный viewport**, синхронизируя масштаб и положение графика.
5. **AxisItem перестраивает оси и сетку**, адаптируя деления и подписи под новый диапазон.
6. **Сцена перерисовывается**, и пользователь получает интерактивное отображение функции или кривой.

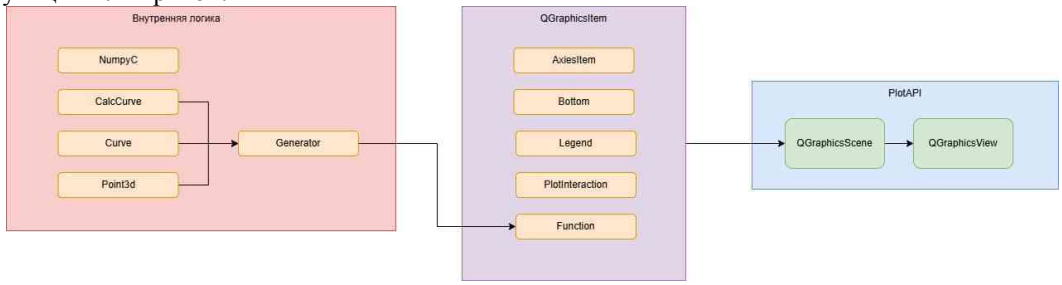


Рис. 2. Схема работы приложения

Был спроектирован несложный пользовательский интерфейс программы. Были реализованы следующие кнопки:

- **Home** — сбрасывает масштаб и положение графика, возвращая область отображения к исходному логическому диапазону.
- **Line** — включает или отключает отображение основной кривой. Позволяет скрывать линию при необходимости анализа только контрольных точек или пунктирной аппроксимации.
- **Points** — управляет отображением контрольных точек. При включении точки выделяются на графике, что удобно при редактировании NURBS-кривой.
- **Punktire** — включает режим отображения пунктирной линии, используемой для визуализации промежуточных данных или аппроксимации.
- **Add Points** — активирует режим добавления новых контрольных точек с помощью мыши. Каждое нажатие на область графика создаёт новую точку, после чего кривая пересчитывается в реальном времени.
- **Clean All** — удаляет все построенные функции, кривые и контрольные точки, полностью очищая сцену.
- **Read File** — загружает набор точек из файла. Поддерживается чтение координат, которые затем автоматически преобразуются в контрольные точки или дискретные значения функции.
- **Save to PNG** — сохраняет текущее изображение графика в файл формата PNG, включая оси, сетку, кривые и легенду.

Разработанная библиотека успешно справляется с построением как простых полиномиальных функций, так и сложных тригонометрических зависимостей [2]. На рисунке 3 представлен график параболы $y = x^2$.

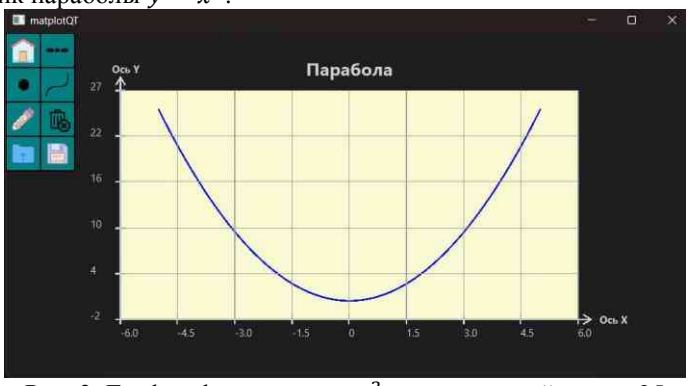


Рис. 3. График функции $y = x^2$, ограниченной по y = 25

Отдельное внимание было уделено корректной работе с NURBS-геометрией. Для тестирования использовались кривые низких и высоких порядков с различными весовыми коэффициентами [1]. На рисунке 4 показан пример NURBS-кривой 10 степени с 12 контрольными точками, образующей сложный изгиб. Дополнительно реализована визуализация контрольного многоугольника (ломаной линии, соединяющей контрольные точки), что важно для отладки и понимания структуры кривой.

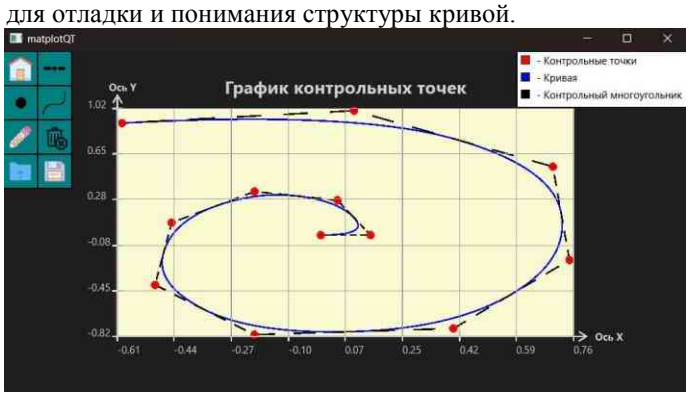


Рис. 4. NURBS 10 степени

Таким образом, разработанный модуль обеспечивает не только базовую функциональность построения графиков, но и предлагает гибкую архитектуру для расширения

функционала под специфические задачи, такие как работа со сплайновыми формами в системах автоматизированного проектирования.

Выводы и заключение

В результате проделанной работы была создана легковесная библиотека для визуализации данных на C++/Qt, выступающая в качестве альтернативы matplotlib для настольных приложений. Удалось реализовать полный цикл отображения математических функций и специализированных NURBS-кривых без привлечения сторонних графических движков. Разработанный виджет демонстрирует высокую производительность рендеринга и может быть легко интегрирован в существующие проекты для просмотра геометрии.

В текущей версии библиотеки пользователь может:

- изменять цвет и толщину линий графиков;
- включать/отключать отображение кривых, контрольных точек и его многоугольников, а также рисовать кривые с помощью мыши;
- масштабировать выделенную область;
- экспортировать текущее изображение в разные форматы.

Все настройки сохраняются между сессиями с помощью **QSettings**, что позволяет использовать виджет в качестве замены matplotlib в долгосрочных проектах без потери пользовательских предпочтений.

Список литературы:

1. Piegl L., Tiller W. The NURBS book. 2nd ed. New York: Springer; 1997. – 646 с.
2. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики: Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 604 с.
3. Matplotlib API. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://matplotlib.org/

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛА РАБОТЫ С NURBS-КРИВЫМИ

Зыкова А.С., Стожаров О.Е., Данилкин В.В., Рыжов С.Н., Уразов А.В., Ганчук С.Н.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Современные системы автоматизированного проектирования и управления жизненным циклом изделия требуют не только точных математических алгоритмов, но и удобных инструментов визуального анализа геометрии. При работе с NURBS- и кривыми Безье важную роль играет возможность быстро загрузить исходные данные, проверить их корректность и отобразить результат непосредственно в графической сцене CAD-приложения [1]. Особенно востребованы такие средства при отладке импортируемой геометрии, анализе тестовых примеров и проверке корректности подготовки исходных данных.

Наш проект представляет собой прикладной модуль системы «Сарус», предназначенный для отображения кривых по данным, заданным во внешнем текстовом файле [2]. Модуль интегрируется в пользовательский интерфейс платформы как отдельная команда, открывает диалог выбора файла, выполняет разбор описаний кривых и строит соответствующие объекты на сцене. Поддерживаются степень кривой, признак периодичности, массив контрольных точек, веса и узловой вектор, что позволяет использовать модуль как для демонстрации кривых Безье, так и для более общего случая NURBS-представления [1].

Архитектурно решение реализовано на языке C++17 и собирается как динамическая библиотека средствами CMake [2]. Внутри проекта выделены компоненты пользовательской команды, сессии модуля, ресурсов локализации и парсера входных данных. Такой подход упрощает сопровождение, позволяет изолировать логику чтения кривых от UI-части и делает модуль удобным для дальнейшего расширения, например для добавления новых форматов входных данных, режимов визуализации или диагностических проверок геометрии.

Практическая ценность репозитория заключается в том, что он служит специализированным инструментом визуального контроля геометрических данных в контуре СПЖЦ «Сарус» [2]. Модуль может использоваться при разработке и тестировании алгоритмов работы с кривыми, при подготовке демонстрационных примеров, а также при локализации ошибок в импортируемых моделях, когда необходимо быстро увидеть исходную форму кривых и проверить, насколько корректно заданы контрольные точки, веса и узлы.

Основная цель данной работы – ознакомиться с кодовой базой СПЖЦ Сарус и научиться интегрировать в данную систему новый, полезный функционал.

Реализация модуля визуализации

RPLM.ShowCurves – это новый модуль СПЖЦ «Сарус», который добавляет в приложение команду «Отображение кривых» [2]. Через эту команду пользователь выбирает текстовый файл с описанием одной или нескольких кривых, после чего модуль выполняет разбор входных данных и отображает результат в сцене CAD-приложения.

Основные задачи модуля:

1. Визуализация тестовых и рабочих наборов NURBS-кривых;
2. Отображение кривых Безье как частного случая NURBS;
3. Проверка корректности структуры входного файла;
4. Выдача диагностических сообщений при ошибках разбора;
5. Поддержка сценариев отладки и анализа геометрии при разработке модулей «Сарус».

На текущий момент репозиторий реализует следующий набор возможностей:

1. Загрузка одного или нескольких описаний кривых из .txt-файла;
2. Чтение параметров Degree, IsPeriodic, Control Points, Weights и Knots;
3. Валидация количества контрольных точек, весов и узлов;
4. Обработка типовых ошибок формата с указанием номера строки;
5. Построение кривых в сцене через геометрические и графические компоненты платформы;
6. Подключение локализованных строк и иконки команды для встраивания в ленту приложения.

В основе функциональности лежат четыре ключевых компонента. Команда UI отвечает за инициализацию процесса: именно она запускает диалоговое окно, обеспечивает выбор необходимого файла и корректно обрабатывает возможные ошибки, возникающие на этапе взаимодействия с пользователем. Далее в дело вступает парсер кривых, который считывает данные из выбранного файла и преобразует их в объекты типа RGK::NURBSCurve. Для корректной работы в приложении используется сессия модуля, которая загружает ресурсы текущего модуля и обеспечивает бесшовную интеграцию всей функциональности в существующую инфраструктуру. Отдельное внимание уделяется ресурсам, которые содержат локализованные названия команды и необходимые графические материалы для отображения интерфейса.

Пример структуры входного файла изображен на рисунке 1.

```
Degree: 2
IsPeriodic: false
Control Points[3]:
0.0, 0.0, 0.0
0.1, 0.2, 0.0
0.0, 0.0, 0.0

Weights[3]:
1, 1, 1

Knots[6]:
0, 0, 0, 1, 1, 1
```

Рис. 1. Примет структуры входного файла с кривой 2-ой степени

Несколько кривых в одном файле допускаются, они разделяются пустой строкой.

Интеграция в «Сарус»

Все модули, входящие в состав системы «Сарус», реализованы в виде динамических библиотек (dll – dynamic link library), что обеспечивает модульность и гибкость архитектуры системы. Такой подход позволяет легко интегрировать новые функциональные компоненты, обновлять существующие модули и минимизировать влияние изменений в одном из них на остальные части системы.

Для сборки динамических библиотек используются средства инструмента CMake, который обеспечивает удобство и автоматизацию процесса компиляции и сборки проекта [2]. Применение CMake позволяет:

- Упростить управление зависимостями между модулями и внешними библиотеками.
- Обеспечить кроссплатформенность разработки, адаптируя сборку для различных операционных систем.
- Использовать современные инструменты компиляции и отладки, улучшая производительность и стабильность создаваемых библиотек.

Кроме того, такая структура системы способствует её масштабируемости, позволяя разработчикам сосредотачиваться на реализации новых функций без необходимости вносить изменения в основной код [2]. Это особенно важно для систем уровня СПЖЦ, где требуется поддержка широкого спектра операций, начиная от управления данными и заканчивая сложными расчетами и визуализацией.

Схема разработки и взаимодействия модуля с приложением «Сарус» изображена на рисунке 2.

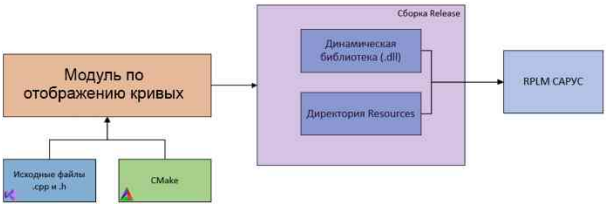


Рис. 2. Взаимодействие модуля с системой «Сарус»

На данной схеме показан процесс создания модуля для отображения кривых с идентификатором RPLM.CAD.ShowCurves. В приложении «Сарус» у каждого модуля имеется свой уникальный ID. Исходными данными для модуля являются файлы с расширениями .cpp и .h, которые обрабатываются с помощью CMake для дальнейшей сборки. Результатом процесса сборки в режиме Release является динамическая библиотека .dll и директория с ресурсами (Resources). Собранный модуль затем интегрируется в систему RPLM «Сарус». Команда была названа как «Отображение кривых» и помещена в ленте приложения во вкладке «Модель». Интерфейс команды изображен на рисунке 3.

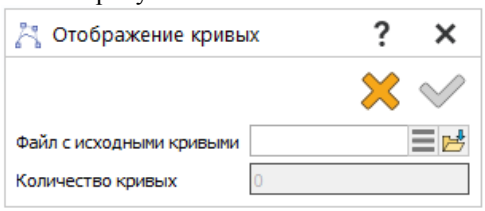


Рис. 3. Интерфейс окна команды «Отображение кривых»

Таким образом, был разработан и интегрирован модуль по отображению кривых с идентификатором RPLM.CAD.ShowCurves в состав системы полного жизненного цикла «Сарус». Модуль создавался на основе исходных файлов с расширениями .cpp и .h, которые определяют основную логику и функциональность для визуализации кривых. Для организации процесса сборки использовалась система CMake.

Тестирование имплементированного модуля

Для проверки корректности работы модуля отображения кривых RPLM.CAD.ShowCurves было проведено тестирование на различных типах кривых. В ходе тестирования оценивалась точность визуализации, корректность построения кривых на основе заданных параметров (степень, контрольные точки, узловой вектор), а также стабильность работы модуля при обработке кривых разной сложности [1].

Тестировались следующие виды кривых:

- Кривая Безье 2 степени;
- NURBS 5 степени;
- NURBS 2-й, 3-й, 5-й, 6-й степени;
- B-slines 2-й, 4-й, 6-й, 12-й степени;
- Кривые Безье 1-й, 3-й, 7-й, 10-й, 20-й степени.

Данный набор тестовых примеров охватывает как простые кривые младших степеней, так и сложные кривые старших степеней, что позволяет комплексно оценить работоспособность модуля в различных сценариях использования.

На рисунке 4 приведен пример отображения B-slines 2-й, 4-й, 6-й, 12-й степени.

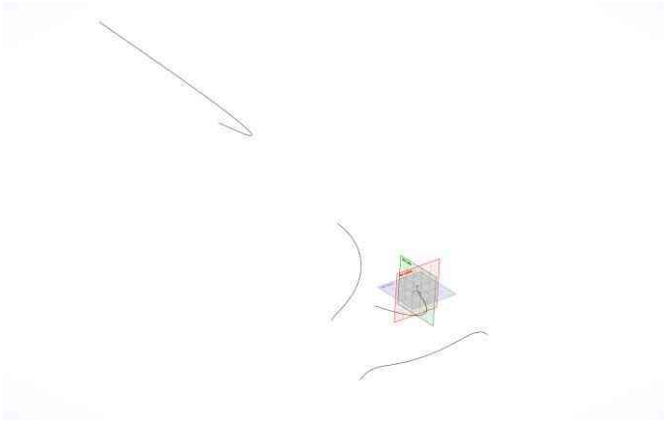


Рис. 4. Пример отображения B-slines 2-й, 4-й, 6-й, 12-й степени.

Выводы и заключение

В результате проделанной работы был разработан модуль RPLM.ShowCurves, который представляет собой специализированный модуль СПЖЦ «Сарус» для отображения кривых на основе внешних описаний. Репозиторий сочетает прикладную ценность для инженерной практики и удобную архитектуру для дальнейшего развития. За счёт использования C++17, CMake, Qt и внутренних библиотек платформы модуль органично встраивается в CAD и может служить основой для расширения инструментов анализа и визуализации геометрии.

Список литературы:

1. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики: Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

2.Отечественная система полного жизненного цикла «Сарус» обеспечит импортонезависимость и безопасность. //САПР и графика, №12, 2023, с. 68-71

Секция «Моделирование физических процессов и явлений»

МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИЯХ РАДИАЦИОННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТРУКТУР ШИРОКОЗОННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Паршин И.М.[1], Бузоверя М.Э.[1,2], Мухин Н.П.[3]

[1]*Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров,*

[2]*ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров,*

[3] *Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, г. Саров*

Широкозонные диэлектрики, ввиду своих свойств, находят достаточно широкое применение в технике и промышленности. Так, кристаллы сапфира широко используются, например, в микроэлектронике как материал современных интегральных схем и в космической технике, а искусственные CVD алмазы являются перспективным материалом для детекторов ионизирующего излучения нового поколения. Диэлектрические подложки с регулярным микро и нанокристаллические рельефом используются при создании современных интегральных схем и в фотонике. Ряд применений накладывает специфические требования по радиационной стойкости этих материалов [1]. Основным источником стабильных радиационных повреждений в облучаемых материалах являются каскады смещений, характерные линейные размеры которых составляют 5-30нм [3]. Большое значение имеют дефекты поверхности, химический состав и др. факторы [2].

В наиболее общей мере исследовать радиационную стойкость, охватывая многочисленные аспекты, способные оказать влияние на устойчивость к воздействию радиации, позволяет многоуровневый подход. В рамках многоуровневого подхода внимание уделяется не только результирующей в ходе облучения структуре поверхности, но также химическому составу и состоянию поверхности в исходном состоянии. Не менее важным вопросом является исследование непосредственно физического процесса дефектообразования, с чем может помочь численное моделирование.

Цель настоящей работы – апробация многоуровневого подхода радиационно-модифицированных структур широкозонных диэлектриков, включающего как комплексное экспериментальное исследование современными инструментальными методами, так и моделирование каскадов смещения методом молекулярной динамики.

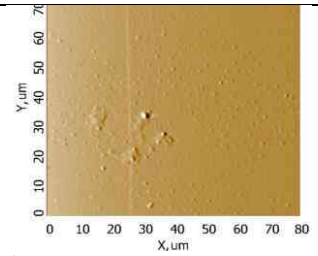
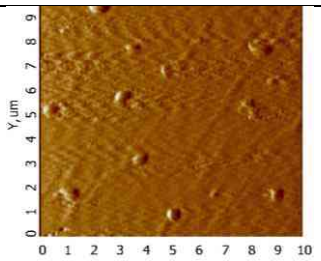
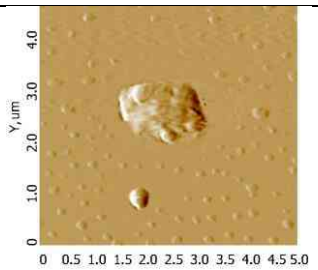
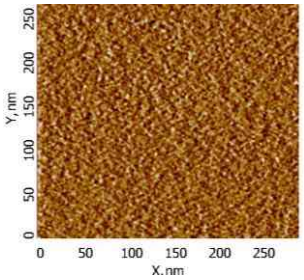
Образцы и методы исследования. Исследовались облученные образцы полированных пластин лейкосапфира (α-Al_2O_3) со структурированной поверхностью и образцы искусственного алмаза без облучения. Флюенс нейтронов составлял 10^{14}, $5\cdot10^{14}$ и 10^{15} см$^{-2}$. АСМ-исследование проводилось не сразу после облучения, а после выдержки образцов в течение некоторого времени при комнатных условиях.

Исследование методом АСМ проводилось на зондовых микроскопах SolverNext (НТ-МДТ, Россия, г. Зеленоград) - сапфир и Vega (ООО «НТ-МДТ», Россия) - алмаз. Сканирование поверхности осуществляли контактным и полуконтактным методами в режиме топографии и латеральных сил. Результаты сканирования обрабатывали программным модулем обработки изображений ImageAnalysis9. Исследование химического состава образцов алмаза проводили на рамановском конфокальном микроскопе. Моделирование методом МД проводилось с использованием программы LAMMPS, межатомное взаимодействие задавалось гибридным потенциалом Терсоффа и Циглера-Бирсака-Литтмарка [4-5].

Результаты и обсуждения. По результатам проведенного АСМ-исследования были выявлены характерные структурно-масштабные уровни, где наблюдались изменения структуры и дефектности сапфировых пластин после нейтронного облучения в диапазоне флюенса 10^{14}...10^{15} см$^{-2}$. Поверхность необлученного образца на микроуровне представляет собой гладкую матрицу с неоднородностями в виде выступов со средней высотой 0,8мкм и латеральным размером 1-2мкм, могут присутствовать следы обработки пластин и крупные каплевидные образования (Рис. 1а). С увеличением флюенса до 10^{15} см$^{-2}$ шероховатость поверхности падает с 8,1нм до 4,7нм; уменьшается количество выступов и высота с 0,7мкм до 0,5мкм (полирующий эффект). Диаметр выступов при этом практически не меняется и составляет ~0,6мкм. Причиной изменения параметров микрорельефа поверхности, возможно, является радиационная эрозия (распыление, испарение, травление) при взаимодействии излучения с поверхностью пластин и дефектами, характерными для исходного состояния. На субмикронном и наноуровне (рис. 1б и 1в, таблица) наблюдается система пиков и включений, а

также возникновение радиационных дефектов в виде блистеров, каскада пор и кратеров. В области выступов при флюенсе $\Phi=10^{14}$ см$^{-2}$ образуются блистеры размером 50-100нм, которые группируются в ассоциаты размером до 300нм. При $\Phi=5\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ размер их достигал 500нм. Часть их вскрывалась с образованием кратеров порядка 100нм и больше. Причиной блистеринга может быть кислород, выделяющийся при радиолизе сапфира. Была исследована структура на уровне кластеров и её изменение после облучения образцов (рис. 1г). Латеральный размер кластеров ~5^{-10}нм практически не меняется с увеличением флюенса, но уменьшается их высота с 2,8нм для необлученного образца до 1,2нм и 0,8нм для образцов с $\Phi=10^{14}$ см$^{-2}$ и $\Phi=10^{15}$ см$^{-2}$ соответственно (в 2,4 и 3,5 раза). Кроме того, обнаружено, что меняется упаковка кластеров в ассоциатах.

Таблица 1- Структурные уровни, их масштаб и классификация

Классификация уровней	Тип структуры	Масштаб	Вид структуры, рис.1
Микроуровень 80x80мкм	Структурированный рельеф (выступы, поры), технологические дефекты после полировки	От 1мкм до 30мкм	 1а
Субмикронный 10x10мкм	Поры, выступы, ступени роста, кратеры	0,2мкм…1 мкм	 1б
Наноуровень 5x5мкм	Система выступов, поры, блистеры, кратеры	50нм…100нм	 1в
Наноуровень Кластерная подсистема: 1x1мкм 0,3x0,3мкм	Кластеры, ассоциаты кластеров, нанопоры	1...30нм	 1г

Хорошим дополнением к АСМ-микроскопии может быть Рамановская спектроскопия, которая позволяет определить химический состав поверхности диэлектриков. На поверхности CVD-алмаза можно заметить особенности рельефа в виде пиков в большом количестве,

достигающие в высоту до 37нм (рис. 2а). Рамановские спектры алмазов, представленные на рисунке 2б показали, что спектр 1 соответствует классическому алмазу; спектр 2 указывает на наличие примеси бора или кислорода.

Методом молекулярной динамики моделировалась решетка алмаза. Для моделирования развития каскадов столкновений атомов в объеме атомов применялся метод PKA (pimaryknock-onatom). Молекулярный временной интервал процесса -5 пикосекунд, но основное развитие каскада происходит в первую пикосекунду (рис. 3).

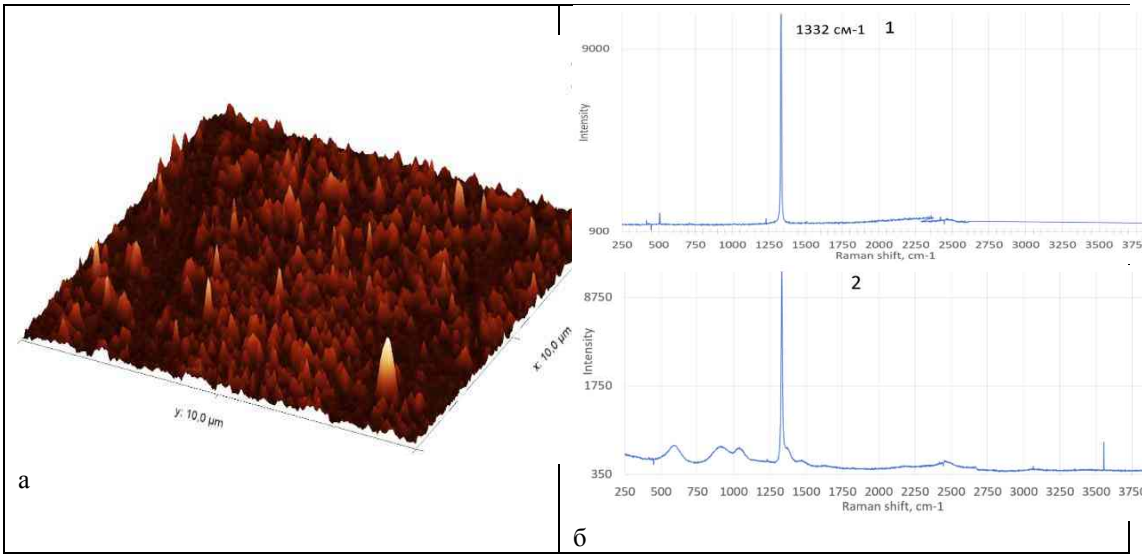


Рисунок 2: а – поверхность образцов CVD-алмаза; б – спектры Рамановской спектроскопии

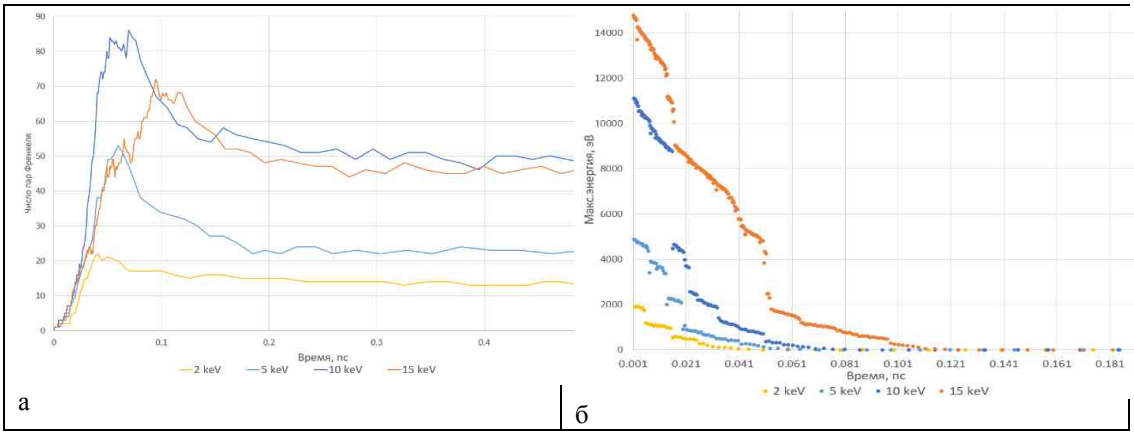


Рисунок 3: а – зависимость числа образованных пар Френкеля от времени процесса; б- зависимость максимальной энергии от времени

В некоторый момент времени число вакансий стремительно возрастает, достигает своего пика, после которого большая часть переданной системе энергии иссякает и начинается релаксация, приводящая к спаду числа дефектов. С ростом энергии PKA-частицы закономерно растет число образуемых ей пар Френкеля, растет и время развития каскада. Также можно заметить, что при увеличении энергии с 10кэВ до 15кэВ максимальное число образованных пар Френкеля, наоборот, спадает, что может быть связано с возросшей ролью ионизационных потерь, которые в модели были учтены. Из рисунка 6 видно, что достижение минимума энергии примерно соответствует моменту достижения максимума пар Френкеля, то, что на практике известно, как «Пик Брэгга».

С помощью моделирования методом МД можно, кроме всего прочего, оценить пространственное распределение дефектов (рис. 4). Это делается с помощью программного пакета OVITO, созданного для визуализации результатов моделирования частиц и молекул. Пакет также позволяет автоматически обнаружить и выделять кластеры дефектов.

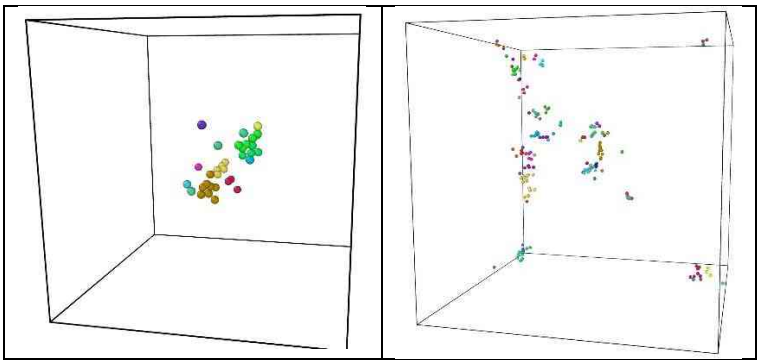


Рисунок 4 – Пространственное распределение кластеров дефектов после прохождения первичной выбитой частицы. Слева – при энергии 2кэВ, справа – при энергии 20кэВ. Разными цветами обозначается принадлежность дефектов к разным кластерам.

С ростом энергии первично выбитой частицы образующиеся дефекты всё сильнее распределяются по структуре, разбиваясь на большое количество небольших кластеров, содержащих в себе в среднем от 1 до 15 атомов, большинство из них концентрируется вдоль направления движения частицы. Объем их в среднем составляет от 2 до 300 A^3, с отдельными кластерами, достигающими в объеме до 1250 A^3. Соответственно линейные размеры кластеров не превышают единиц и десятков ангстрем. Возможно, следует заметить, что результат этого моделирования есть результат воздействия одной частицы.

Заключение.

В ходе работы на примере радиационно-модифицированных сапфира и алмаза был опробован многоуровневый подход исследования эволюции радиационных дефектов.

По результатам АСМ-исследования поверхности сапфира после нейтронного облучения были выделены структурно-масштабные уровни, где зафиксированы изменения структуры поверхности и процессы возникновения радиационных дефектов разной направленности и интенсивности, включая кластерный уровень.

По результатам моделирования методом МД была рассмотрена динамика развития каскадов межатомных столкновений в алмазе и пространственное распределение кластеров дефектов.

Данный подход может быть использован в изучении процессов зарождения и эволюции дефектной структуры при облучении не только сапфировых подложек и CVD-алмаза, но и других материалов и видов излучений.

Список литературы:

1. Новиков Л.С. Радиационное воздействие на материалы космических аппаратов. Учебное пособие. –М.: Университетская книга, 2010. -192с.
2. Физическое материаловедение. Т. 4. Радиационная физика твердого тела. Под редакцией Б.А. Калина. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. -624с.
3. Новые материалы: Перспективные технологии и методы исследования материалов: Сборник тезисов докладов 22-й Международной конференции им. Б.А. Калина для молодых ученых и специалистов. М.: НИЯУ МИФИ. 2024. 248с.
4. J. Tersoff, Phys Rev B, 39, 3566 (1989); errata (PRB 41, 3248)
5. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark, ‘Stopping and Ranges of Ions in Matter’ Vol 1, 1985, Pergamon Press.

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОВЫХОДА СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Коробов С.А.[1], Вельдин Д.С.[1], Кочетков Д.А.[2], Кочетков В.А.[2],
Даньков Р.Д.[2], Садовников С.И.[1], Шершенов Н.В.[1]
[1]*Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров*
[2]*Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, г. Саров*

Сонолюминесценция (СЛ) – явление импульсного испускания света пузырьками газа (пара, парогазовой смеси) в жидкости, возникающее под действием акустических колебаний [1-4].

Различают многопузырьковую (МПСЛ) [5] и однопузырьковую (ОПСЛ) [6] сонолюминесценцию. Во всех наиболее развитых моделях ОПСЛ источником излучения является высокотемпературная плазма, образующаяся на этапе сжатия пузырька. Интенсивность излучения определяется температурой плазмы, которая, при прочих равных условиях, зависит от степени сжатия газа внутри пузырька, т.е. от его динамики.

В данной работе впервые исследовалась ОПСЛ в системе водный раствор формамида (CH_3NO)-воздух и вода-воздух в диапазоне температур жидкости 5–30 °C. Решались следующие задачи:

- разработка методов оценки световыхода сонолюминесценции и определения световыхода.

Первый метод заключается в численном решении уравнения Релея—Плессета с поправками Келлера [3], описывающего временную эволюцию радиуса пузырька $R(t)$ с учетом сжимаемости жидкости и акустического излучения. Зная зависимость $R(t)$ и экспериментально измеренный спектр излучения, можно рассчитать полное число испущенных фотонов $N_ф$. В основе этого расчета лежит предположение, что пузырек излучает как абсолютно черное тело с температурой T, определяемой из спектра по закону смещения Вина $\lambda T = b$. Интегрирование мощности излучения по времени жизни пузырька и спектральному диапазону позволяет получить теоретическую оценку световыхода.

Второй метод основан на использовании в качестве детектора излучения фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) с высоким временным разрешением. В этом случае световыход определяется по характеристикам электрического сигнала с ФЭУ. Зная амплитуду импульса напряжения U_{max}, его длительность Δt, сопротивление нагрузки R и паспортную чувствительность ФЭУ $S_ф$, можно определить число фотонов, попавших на фотокатод. При этом необходимо учитывать, что излучение пузырька распространяется в полном телесном угле 4π, в то время как детектор регистрирует лишь его часть, ограниченную телесным углом Ω. Это позволяет нам определить полный световыход пузырька.

При выполнении работы проведены:

-расчеты относительного радиуса пузырька $\frac{R(t)}{R_0}$ при различных температурах;

-экспериментальные измерения интенсивности и спектров излучения;

-расчет световыхода на основе спектральных данных и динамики пузырька;

-расчет световыхода на основе сигналов с ФЭУ с учетом телесного угла и чувствительности детектора.

Для описания динамики пузырька используется уравнение Релея-Плессета с поправками Келлера [3], учитывающими сжимаемость жидкости и акустическое излучение.

$$R\rho_m\left(1-\frac{R_t'}{C_m}\right)R_{tt}'' + 1.5\rho_m\left(1-\frac{R_t'}{3C_m}\right)R_t'^2 - \left(1+\frac{R_t'}{C_m}\right)\left(P_g - P_m\right) + \frac{2\sigma_m}{R} + \frac{4\mu_m R_t'}{R} = 0,$$

где $\rho_m, \mu_m, \sigma_m, C_m$ – плотность, вязкость, поверхностное натяжение и скорость звука раствора. Зависимость этих величин от температуры и концентрации взяты из [7].

$P_m = P_{0m} - P_A\sin(2\pi\nu t)$ давление в растворе, состоящее из статического и динамического (P_a– амплитуда, ν – частота акустического поля) слагаемых, P_g – давление в газовом пузырьке. Уравнение решалось численно при начальных условиях: $R(0) = R_0, R_t'(0) = 0$ ($R_0 = 5$ мкм – фиксированный начальный радиус пузырька).

Измерение интенсивности и спектра излучения проведено на установке студенческой лаборатории СарФТИ “Физика высоких плотностей энергии” [8,9]. Постоянство температуры в опытах обеспечивалось термостатом. В качестве детектора излучения использовали фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с временным разрешением 1 нс.

Первый метод.

Для абсолютно черного тела справедливы, следующие соотношения:

$$\lambda T = b \quad (1)$$

$$M = \sigma T^4 \quad (2)$$

где λ- длина волны, Т-температура, b-постоянная Вина, σ – постоянная Стефана-Больцмана. Энергетическая светимость M связаны с энергией dE, излучаемой поверхностью пузырька площадью $\Delta S = 4\pi R^2(t)$ ·за время dt, следующим образом:

$$M = \frac{dE}{\Delta S \cdot dt} = \frac{dE}{4\pi R^2(t) \cdot dt} \quad (3)$$

Выражая dE из (3) и подставляя (1) и (2), получаем выражение для энергии, излучаемой пузырьком за время dt:

$$dE = 4\pi\sigma \left(\frac{b}{\lambda}\right)^4 R^2(t)dt \quad (4)$$

Для учёта спектрального распределения излучения введём нормированную функцию формы спектра $f(\lambda)$, определённую по экспериментально измеренному спектру $I(\lambda)$:

$$f(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda)d\lambda} \quad (5)$$

Тогда с учётом (5) выражение (4) для элементарной энергии, приходящейся на интервал длин волн $d\lambda$ и временной интервал dt, принимает вид

$$dE = 4\pi\sigma \left(\frac{b}{\lambda}\right)^4 R^2(t)f(\lambda)d\lambda dt \quad (6)$$

Энергия одного фотона с длиной волны λ есть $\mathrm{h}\frac{\mathrm{c}}{\lambda}$, где h – постоянная Планка, с – скорость света в вакууме, λ – длина волны. Переходя от энергии (6) к числу фотонов $dN_ф$, получаем:

$$dN_ф = \frac{dE}{h\frac{c}{\lambda}} = 4\pi\sigma \frac{b^4}{hc\lambda^3} f(\lambda)R^2(t)d\lambda dt \quad (7)$$

Интегрируя выражение (7) по всему спектральному диапазону и по времени сжатия пузырька (от t_1 до t_2), находим полное число фотонов, испущенных за один акт схлопывания:

$$N_ф = \frac{4\pi\sigma b^4}{hc} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{f(\lambda)}{\lambda^3} d\lambda \int_{t_1}^{t_2} R^2(t)dt \quad (8)$$

При расчёте $N_ф$ использовались значения $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4})$, $b = 2{,}90 \cdot 10^{-3}$ (м · К)

Второй метод.

Размерность чувствительности ФЭУ, представленной разработчиком, имеет вид:

$$[S_ф] = \frac{\text{мА}}{\text{Вт}} = \frac{\text{мА·с}}{\text{Дж}} \quad (9)$$

Преобразуем данную чувствительность в новую величину $S'_ф$, имеющую размерность $\frac{\text{мА·с}}{\text{фотон}}$. Для этого перейдём от Дж к числу фотонов. Для оценки будем считать, что число фотонов в 1Дж равно:

$$N_ф = (\frac{hc}{\lambda})^{-1} \quad (10)$$

где h – постоянная Планка, с – скорость света в вакууме, λ – длина волны, на которой наблюдается максимум в спектре излучения сонолюминесецнции.

Тогда с учётом (10) соотношение между $S_ф$ и $S'_ф$ примет вид:

$$S'_ф = S_ф \cdot \frac{hc}{\lambda} \quad (11)$$

Зная значение $S'_{\text{ф}}$, можно оценить число фотонов, попадающих на катод ФЭУ за время импульса излучения по следующей формуле:

$$\varphi_{max} = \frac{I_{max} \cdot \Delta t}{S'_{\text{ф}}}, \quad (12)$$

где I_{max} – максимальный ток, протекающий в нагрузке ФЭУ, Δt – ширина импульса сигнала с ФЭУ на полувысоте.

Значение I_{max} определяется из соотношения:

$$I_{max} = \frac{U_{max}}{R_{\text{н}}}, \quad (13)$$

где U_{max} – амплитуда импульса сигнала с ФЭУ, а $R_{\text{н}} = 50$ Ом.

Поскольку излучающий пузырёк можно считать точечным источником, испускающим свет в полный телесный угол 4π, то с учётом этого световыход пузырька должен определяться по формуле:

$$F = \varphi_{max} \cdot \frac{4\pi}{\Omega}, \quad (14)$$

где Ω – телесный угол, под которым виден катод фотоэлектронного умножителя из точки, в которой находится источник излучения. Данный телесный угол задаётся выражением:

$$\Omega = 2\pi\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{r}{R}\right)^2}}\right), \quad (15)$$

где r – радиус катода фотоэлектронного умножителя, R – расстояние от излучающего пузырька до катода ФЭУ.

Объединяя уравнения (11) – (15), можно получить конечное выражение для оценки световыхода излучения сонолюминесценции:

$$F = \frac{U_{max}}{R_{\text{н}}} \frac{\Delta t}{S_{\text{ф}} \cdot \frac{hc}{\lambda}} \frac{2}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{r}{R}\right)^2}}\right)} \quad (16)$$

Значения величин, используемые при вычислениях: $R_{\text{н}} = 50$ Ом, $\Delta t \approx 0.5$ нс, $r = 12.5$ мм, $R = 25.5$ мм, $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, $c = 3 \cdot 10^8$ $\frac{\text{м}}{\text{с}}$, λ = 490 нм в системе дистиллированная вода – воздух и λ = 540 нм в системе формамид – воздух.

Результаты численного моделирования динамики “пузырька” для систем “формамид-воздух” и “вода-воздух” приведены на рис. 1. На рис. 2 приведены спектральные характеристики свечения пузырька, на рис.3 даны, в качестве примера, формы импульсов с ФЭУ, полученные в ходе измерений. Результаты определения световыхода даны в таблице 1.

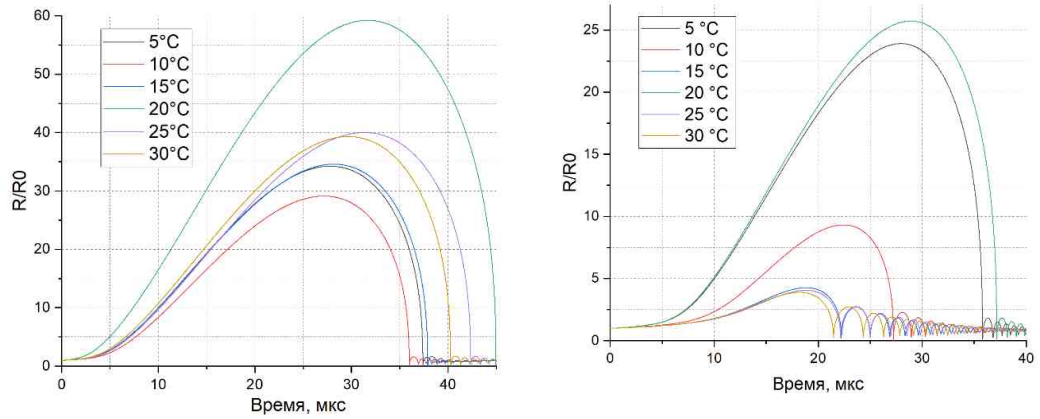


Рисунок 1 - График зависимости $\frac{R(t)}{R_0}$ в диапазоне температур от 5 °C до 30 °C для системы формамид - воздух и вода - воздух

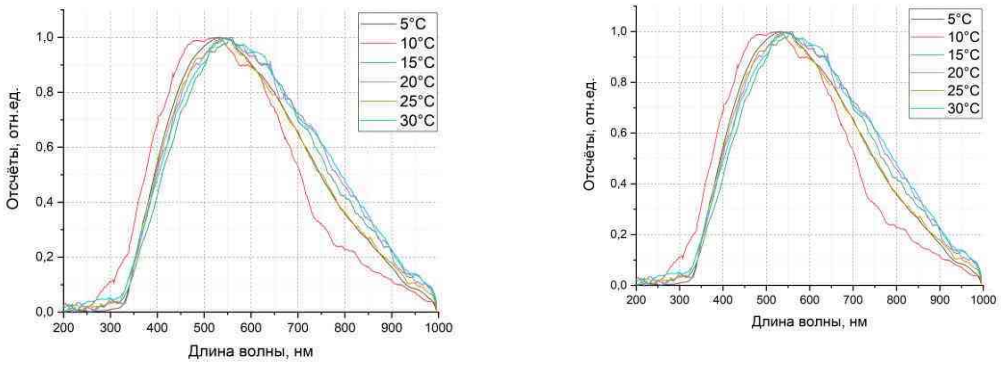


Рисунок 2 - Спектры СЛ в системе дистиллированная вода – воздух и формамид – воздух при температуре 5 – 30 °C

Таблица 1 – Результаты определения световыхода

Температура, °C	$\frac{R(t)}{R_0}$	Световыход в системе “вода – воздух”, 10^8		$\frac{R(t)}{R_0}$	Световыход в системе “формамид – воздух”, 10^8	
		Метод 1	Метод 2		Метод 1	Метод 2
5	23.9	15.5	10.3	34.2	29.8	31.6
10	9.3	10.2	9.3	29.1	23.7	18.5
15	4.2	8.9	9.0	34.6	30.6	6.6
20	25.7	21.5	5.9	59.2	45.3	14.2
25	4.1	9.3	7.9	40.0	39.1	40.8
30	3.9	7.8	6.7	39.3	33.2	20.2

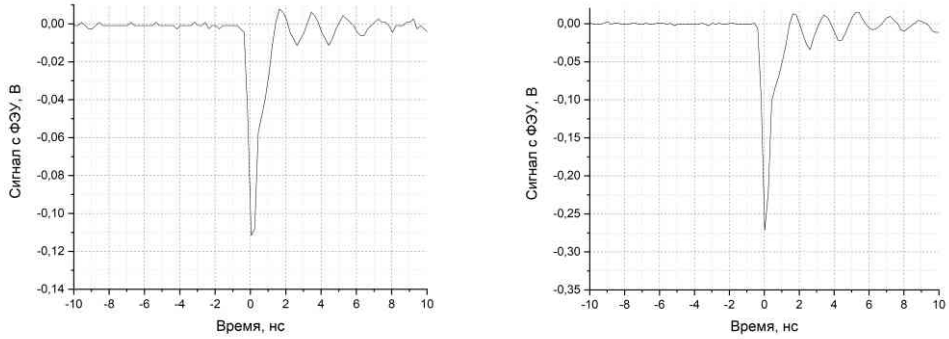


Рисунок 3 - Форма импульсов сигнала с ФЭУ для систем вода-воздух и формамид-воздух

Анализ результатов

- В системе “вода–воздух” наблюдается удовлетворительное согласие методов в интервале 10–30 °C, кроме точки 20 °C. Для формамида расхождения значительнее, что может быть связано с особенностями среды или погрешностью. Тем не менее, оба метода дают совпадающие по порядку величины значения световыхода, что указывает на корректность обоих подходов;
- система “формамид–воздух” обеспечивает более высокий световыход, чем вода, практически во всём диапазоне. Максимальный световыход в формамиде зафиксирован при 5 °C (~$30 \cdot 10^8$) и 25 °C (~$40 \cdot 10^8$), где оба метода дают близкие значения. В воде значения ниже и колеблются в пределах (6-10) $\cdot 10^8$;
- зависимость относительного радиуса “пузырька” от температуры существенно немонотонна, как следствие зависимость световыхода от температуры также немонотонна;

Список литературы:
1. Barber B.P., Hiller R.A., Lofstedt R. et al. Defining the unknowns of sonoluminescence // Phys. Rep. 1997. V. 281. №2. P. 67–143.
2. Margulis M.A. Sonoluminescence and reactions in cavitation. A review // PhysicsUspekhi. 2000. V. 43. P. 243– 257.
3. Brenner M.P., Hilgenfeld S., Lohse D. Single-Bubble Sonoluminescence // Reviews of Modern Physics. 2002. V. 74. P. 425–484.
4. Lauterborn W., Ohl C.D. Cavitation bubble dynamics // Ultrason. Sonosystem. 1997. V. 4. P. 65–75.
5. Frenzel H, Schlütes H Z. Luminescenz im ultraschallbeschickten Wasse // Phys. Chem. 1934. 27 421.
6. Gaitan D.F., Club L.A., Church C.C., Roy R.A. Sonoluminescence and bubble dynamic for a single, stable cavitation bubble // J. Acoust. Soc. Am. 1992. V. 91. P. 3166-3183.
7. Канунникова О. М., Маратканова А. Н., Шаков А. А. Марьин М. В., Решетников С. М. Исследование структурно зависимых свойств водных растворов формамида // Химическая физика и мезоскопия. 2010. №1. С. 93-101.
8. Козабаранов Р. В., Борисёнок В. А., Диденкулов И. Н., Буркацкий А. С., Егоров А. С., Литвинов Д. А., Чернов В. В. Пьезокерамический резонатор для исследования сонолюминесценции// Акустический журнал. 2020. Т. 66, №3. С. 278 – 283.
9. Буркацкий А.С., Голунов А.С., Макаров И.В., Малозёмов А.А., Уткин Д.С., Чвоков И.С., Кочетков В.А., Кочетков Д.А., Даньков Р.Д. Термостат для проведения опытов по изучению сонолюминесценции // Сборник материалов XVIII Всероссийской молодёжной научно-инновационной школы «Математика и математическое моделирование». 2024. Интерконтакт. С.289.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ДЛИННОМЕРНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ОБРАЗЦОВ

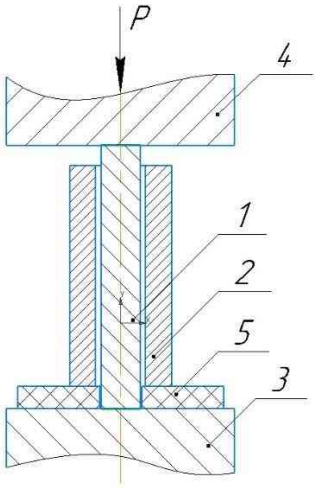
Пухов М.А., Филяев А.А., Горелова Е.В., Мохрова Е.А.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В настоящее время для определения статических механических свойств материалов используются в основном испытания на одноосное растяжение по ГОСТ 1497-84 [1], относительная простота которых даёт ряд преимуществ. В то же время угрозу прочности ряда изделий представляют нагрузки, создающие сложное, неоднородное напряженно-деформированное состояние, в котором превалируют и достигают критических значений сжимающие напряжения. Свойства при сжатии у многих материалов отличаются от характеристик, полученных при испытаниях на растяжение. Одним из таких материалов является сплав АМг6 [2]. Прочностные свойства этого сплава при сжатии выше, соответственно выше стойкость изделия, работающего на сжатие.

Высокая точность испытаний на растяжение обеспечивается, главным образом, за счёт использования длинномерных образцов, у которых длина рабочей части многократно превышает её диаметр. Но свободное сжатие длинномерных стержневых образцов невозможно из-за потери их устойчивости, когда вместо одноосного сжатия происходит изгиб образца, и возможность получения диаграммы деформирования при сжатии теряется.

Поэтому наиболее часто на сжатие испытывают так называемые однократные образцы, длина которых равна их диаметру. Потеря устойчивости таких образцов исключена, однако возникает другая проблема, влияющая на точность полученных результатов. Это силы трения, возникающие по мере сжатия на торцовых поверхностях образца, из-за которых вместо одноосного сжатия в образце возникает сложное неоднородное напряженно-деформированное состояние и прочность получается завышенной. Предпринимается ряд мер по устранению сил трения на торцах, но ни одна из них проблему полностью не решает.

Проблему потери устойчивости длинномерного образца предложено решить с размещением его в кондукторной втулке согласно рисунку 1.



1 – образец; 2 – кондукторная втулка; 3 – нижний захват;
4 – верхний захват; 5 – мягкая подложка.

Рисунок 1 – Схема испытания образца с принудительным сохранением его прямолинейного состояния в кондукторной втулке

Между втулкой и образцом создаётся зазор, достаточный для беспрепятственного расширения образца при его сжатии, что исключает запрессовку образца в отверстии и позволяет извлекать его из втулки после завершения опыта. Стремление к потере устойчивости образца неизбежно и при сжатии его во втулке, однако в этом случае стрела прогиба не может превысить величину зазора.

Исследования по отработке способа на одноосное сжатие длинномерных стержневых образцов проводились на испытательной установке Shimadzu AG-X с регулируемой скоростью подвижной траверсы испытательной машины при непрерывной регистрации усилий и деформаций во всем временном интервале испытаний. Регистрация деформаций при испытаниях проводилась с использованием контактного датчика Shimadzu серии SG с базовой длиной 50 мм, который соответствует классу 0,5 стандарта ISO 9513: 1996.

Для испытания на сжатие использовались изготовленные из алюминиевого сплава АМцС длинномерные стержневые образцы диаметром 4 мм, с кратностью (отношением длины к диаметру) как: пять, шесть, десять. В качестве сравнительной базы для дальнейшей аттестации предложенного способа использовались результаты испытаний на сжатие двукратных стержневых образцов, размеры которых рассчитаны по ГОСТ 25.503-97 [3].

На сжатие без направляющей кондукторной втулки было испытано пять двукратных образцов из сплава АМцС. На рисунке 2 показаны диаграммы деформирования при сжатии двукратных образцов.

Вариация условного предела текучести в принятых к зачёту опытах при среднем значении 109 МПа происходила в пределах от 106 МПа до 115 МПа, что соответствует разбросу значений ~ 8,5 %. После испытания образец приобрёл бочкообразную форму с занижением диаметров у торцов.

На сжатие с направляющей кондукторной втулкой было испытано пять пятикратных образцов из сплава АМцС. На рисунке 3 показаны диаграммы деформирования при сжатии пятикратных образцов.

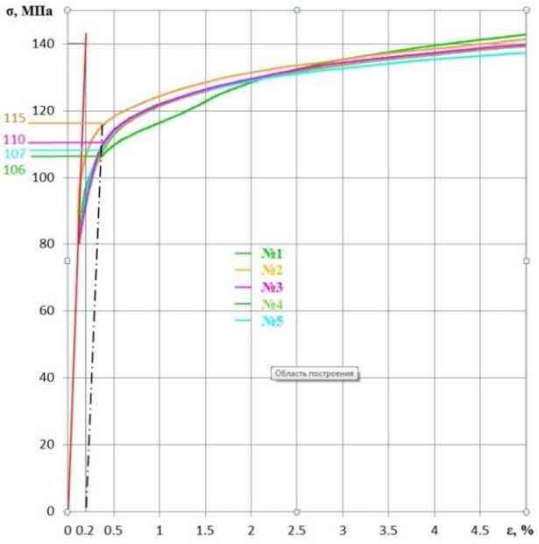


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования при сжатии двукратных образцов из сплава АМцС

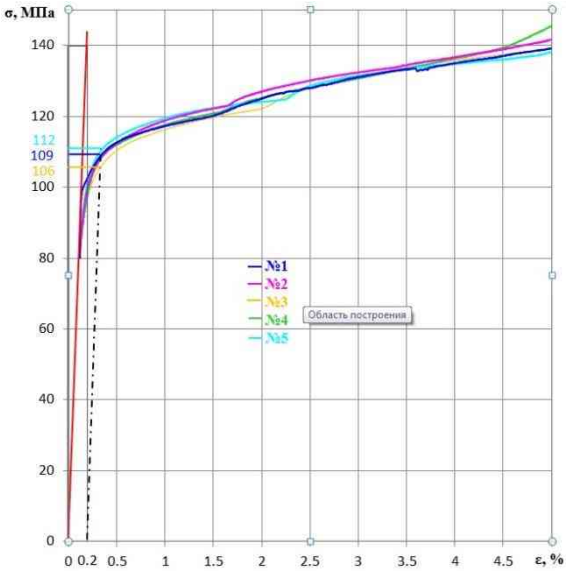


Рисунок 3 – Диаграммы деформирования при сжатии пятикратных образцов из сплава АМцС

Вариация условного предела текучести в принятых к зачёту опытах при среднем значении 109 МПа происходила в пределах от 108 МПа до 112 МПа, что соответствует разбросу значений ~ 5,7 %.

На сжатие с направляющей кондукторной втулкой было испытано четыре шестикратных образцов из сплава АМцС. На рисунке 4 показаны диаграммы деформирования при сжатии шестикратных образцов.

Вариация условного предела текучести в принятых к зачёту опытах при среднем значении 110,8 МПа происходила в пределах от 108 МПа до 113 МПа, что соответствует разбросу значений ~ 4,6 %.

На сжатие с направляющей кондукторной втулкой было испытано пять десятикратных образцов из сплава АМцС. На рисунке 5 показаны диаграммы деформирования при сжатии десятикратных образцов.

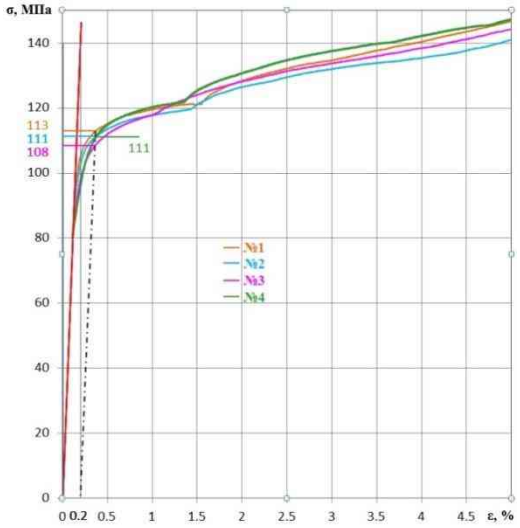


Рисунок 4 – Диаграммы деформирования при сжатии шестикратных образцов из сплава АМцС

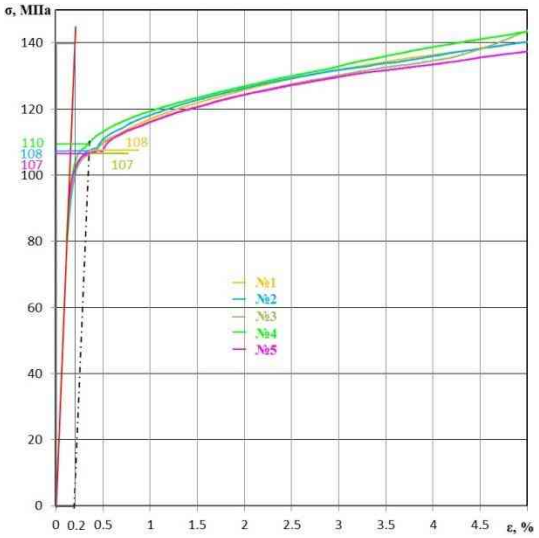


Рисунок 5 – Диаграммы деформирования при сжатии десятикратных образцов из сплава АМцС

Заключение

Проведенными исследованиями на сжатие длинномерных стержневых образцов из алюминиевого сплава АМцС установлена работоспособность разработанного устройства для испытания на одноосное сжатие длинномерных стержневых образцов, обеспечивающего при достаточно глубоком пластическом деформировании получение диаграмм деформирования с минимальным разбросом данных.

С целью дальнейшей отработки предложенного способа и устройства необходимо провести испытания на сплаве АМцС для сравнения прочностных характеристик при растяжении и сжатии.

Список литературы:

1. ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».
2. С.Т. Милейко, В.И. Теленков. Кратковременная ползучесть алюминиевых сплавов. Новосибирск.
3. ГОСТ 25.503-97 «Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие».

ОТ МАГНИТНОГО КОМПАСА К ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ НАВИГАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

УстиновС. В., АнтоновВ.В., ВолковС.С., ХамитовА.Ф.
Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени В.Ф. Маргелова, г. Рязань

Введение

С ранних времен люди передвигались с одного места на другое находя или зная дорогу. Это требовало некоторых знаний в навигации. Об этом косвенно сказано в Библии. Самое первое применение инерциальной навигации было на суше. Затем возникла потребность в исследовании дальних областей Земного шара, поэтому были разработаны средства для применения в морском деле. Позднее были осуществлены важные разработки в инерциальных датчиках и системах для инерциальной навигации на суше, в воздухе, на воде и под водой, а также в межпланетном пространстве и за его пределами.

Наши предки путешествовали в поисках еды обычно на суше. В последствии они научились пересекать реки, используя ориентиры, а значит, осуществляли навигацию, посредством наблюдения. Дальнейшее развитие навигации, укрепляемое техническими приемами, было замечено, когда полинезийцы пересекли Тихий океан примерно 3000 лет назад, используя их представления о небесных телах и ориентирах. Эти приемы можно было использовать только при ясных погодных условиях. В тринадцатом столетии китайцы открыли свойства магнита и применили принципы магнетизма, чтобы сконструировать компас. Они успешно использовали этот прибор в навигации, пересекая Южно-Китайское море. Это устройство можно было использовать вы любых погодных условиях. Другим важным изобретением, помогающим путешествовать на дальние расстояния был секстант, который позволял точно фиксировать положение на карте.

В семнадцатом столетии сэр Исаак Ньютон сформулировал законы механики и гравитации, на которых основывалась инерционная навигация. Несмотря на это, два столетия назад были разработаны инерциальные датчики, которые позволяли демонстрировать приемы инерциальной навигации. Тем не менее, в начале восемнадцатого века были совершены несколько открытий: Серсон представил стабилизированный секстант, Харрисон сконструировал точный хронометр, это изобретение позволило наблюдать небесные объекты без привязки к горизонту и позднее позволило точно определять географическую долготу. Когда эти приборы использовались с картами и таблицами расположения небесных тел, они позволяли уточнять навигацию [1–3].

Фуко открыл гироскопический эффект в 1852 году. Он был первым, кто ввел этот термин. Другие ученые, такие как: Бонеберер, Джонсон и Лемар – разработавшие похожие устройства. Все они изучали вращательное движение Земли и вращательную динамику. Они использовали способность вращения осей, вращающегося диска, чтобы зафиксировать его положение в пространстве.

Позднее, в девятнадцатом веке, было сделано много точных гироскопических приборов. Вместе с тем были различные остроумные применения принципа гироскопа в «тяжелом» оборудовании таком как мельница. Важное открытие было сделано в 1890 году профессором Г.Х. Брайоном в звонких полых цилиндрах, названное «феноменом твердотельного гироскопа».

В начале 20-го века появился гироскоп для вычисления направленной точки отсчета. Основные принципы этого устройства, - это точное указание на север путем точного создания состояния равновесия между его эффектом маятника и угловым моментом вращающегося основания компаса. Естественно, этот прибор был чувствителен к ускорению. Профессор Макс Шулер разработал прибор с вертикальной установкой системы, позволяющей точно определить вертикаль отсчета. Этот прибор был настроен на период колебаний, определяемый как $2\pi\sqrt{\frac{r}{g}}$, приблизительно равной 84 мин., где *r*- радиус Земли, *g*- ускорение свободного падения.

Позднее этот прием стал носить название «настройка Шулера», эта фраза была придумана доктором УолтеромУригли из Масачусецкого института технологии США. Этот оригинальный метод явился основой для создания прибора нечувствительного к ускорению для использования в море. Эльмер и Лоуренс Сперри улучшили данную разработку гироскопа, а дальнейшее усовершенствование осуществили Браун и Пери. Эти приборы обеспечили первые шаги в направлении всепогодной автономной навигации. Также братья Сперри впервые применили гироскопический эффект для контроля и управления в начале 20-го века. Они оснастили автоматикой и навигацией оборудование для использования на самолетах и гироскопы для использования в торпедах.

Индикаторы угловой скорости, искусственные горизонты и направленные гироскопы для самолетов были сконструированы к 1920 году. В это же время были разработаны датчики скольжения на крыло, датчики ускорения с разомкнутой кольцевой системой, Шулер представил устройство ориентирования на север, использование которого давало точность в 22 угловые секунды! Это было важным достижением в начале 20-го века для разработки устойчивых платформ для систем контроля огня орудий на кораблях и получения данных для инерциальной навигационной системы (ИНС). Бойков предложил использовать датчики ускорения и гироскопы в инерциальной навигации. Тем не менее, на этой стадии качество инерциальных датчиков было не достаточным для производства и демонстрации в таких системах.

Вторая мировая война продемонстрировала принципы инерциального управления в ракетах BI и BII немецкими учеными, это был первый шаг в направлении использования систем с обратной связью для точного наведения. В это время в различных частях мира активно разрабатывались новые типы инерциальных датчиков, улучшались их характеристики, и в 1949 году был предложен первый концепт для бесплатформенной технологии навигации.

Новый этап в разработке и инновациях начался в 1950 годах, с использованием военных разработок для мирного воздушного транспорта. Было произведено много точных датчиков, благодаря которым значительно увеличилась точность гироскопа. Погрешность таких датчиков была уменьшена с 15^{o}/ час до $0{,}01^{o}$/час. Профессор Чарльз СтаркДреппер и его ассистенты из Массачусетского технологического института внесли большой вклад изобретением плавающего прецессионного гироскопа. Также в 1950 годах принцип обратной связи по усилению был применен в акселерометре для изготовления высокоточного прибора для измерения ускорения.

В первой половине 50-х годов была произведена стабилизированная платформа инерциальной системы, следствием которой было первое пересечение территории США на самолете с использованием точной инерциальной навигации. Инерциальные навигационные системы стали стандартным оборудованием для военных самолетов, кораблей и подводных лодок в 1960 годах, все эти разработки используют так называемую технологию платформ. Эта эра показала дальнейшие важные разработки с увеличением точности датчиков, миниатюризация этих устройств и началом разработок гироскопа на кольцевом лазере.

Главные проекты этого периода, где применялись технологии инерциальных систем, - это в программировании баллистических ракет и разведке пространства.

Аналогичные достижения имеют место в последние два десятилетия. Важнейшим продвижением вперед было применение микрокомпьютеров и разработка гироскопов с большим динамическим диапазоном, позволяющим реализовать принцип бесплатформенной

технологии. Это позволяет уменьшить значительно размер и сложность инерциальной навигационной системы для многих случаев. Использование новаторских методов позволило сделать небольшие, надежные, прочные и точные инерционные датчики с большим диапазоном применений, которые можно производить дешевыми. В этот период произошли и важные продвижения вперед в разработке твердотельных датчиков, таких как: оптико-волоконные гироскопы и кремневые акселерометры.

Разработка инерциальной навигационной системы в последние годы характеризовалось поэтапным переходом от устойчивой платформы к бесплатформенной технологии (рисунок 1) [1–3].

Рисунок дает информацию о расширении применения бесплатформенных систем, результатом которого является совершенствование технологии гироскопов. Результатом этой технологии является создание миниатюрного прецессионного инерционного гироскопа, динамически настраиваемого гироскопа,кольцевого лазера, оптоволоконного датчика вращения, вибрирующих гироскопов.

Микроэлектронные механические датчики обеспечивают расширение диапазона применения в инерциальной навигации.

Бесплатформенные системы широко используются в самолетах, БПЛА (ЗРК) и в управлении ракетами. Большество этих технологий было применено на кораблях и подводных лодках как отображено на рисунке 1. Диаграмма показывает применение для бесплатформенной технологии, где требуются данные с гироскопов относительно положения и размера устройства, о которых упоминалось ранее.

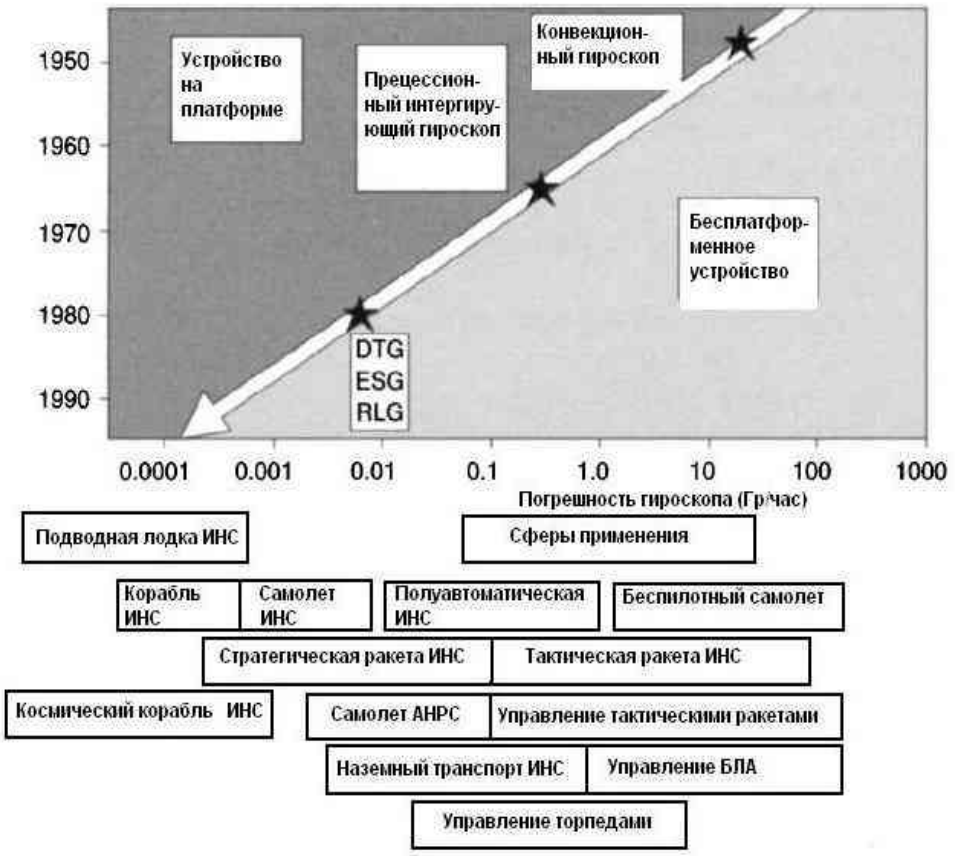


Рисунок 1 – Развитие бесплатформенного датчика и сферы его применения

Современная система инерциальной навигации.

Из сказанного видно, что указанный диапазон применений, в которых системы инерциальной навигации могут использоваться очень широк: сопроводительная навигация кораблей, самолетов, тактических и стратегических ракет, космических кораблей. Кроме того, известны некоторые применения в области робототехники, активных измерительных приборах

скорости или высокотехнологичных двигателях автомобилей и для наблюдения поверхностей дорог и магистралей.

Такие разные применения, обусловлены навигационными системами, имеющими очень широкий диапазон характеристик. Для примера, использование в тактических ракетах инерциальной навигации и управления может требовать точности несколько сотен метров в минуту и несколько секунд, в то время как для других бортовых систем требуется функционирование в течении нескольких часов пока сохраняются точные данные о положении самолета на протяжении одной или двух морских миль и более. В случае морского или космического применений, требуются такие системы, чтобы обеспечить точные навигационные данные на протяжении недель, месяцев или даже дольше в случае межпланетных исследований. Один из таких примеров космический корабль «Вояджер», который летел сквозь Солнечную систему и за ее пределы более чем 25 лет.

Несмотря на то, что основные принципы систем инерциальной навигации не меняются от применения к применению, не удивительно, что точность инерциальных датчиков и точность, связанная с вычислением, должны определять варианты более широкого диапазона применений, показанных ранее. Из вышесказанного следует, что инструментальные технологии и технические приемы, используемые для реализации навигационной функции в таких размерах, областях также значительно меняются.

Тенденции в разработке инерциальных датчиков.

Число категорий инерциальных датчиков очень важный шаг особенно в последнее десятилетие. Разработка микромашинных электромеханических систем очевидно и позволяет достичь подходящего инерциального уровня уже в ближайшем будущем. Разработка микрооптических электромеханических систем (МОЭМС), высокотехнологичных датчиков ожидается в недалеком будущем [4–6].

Новые технические приемы, такие как низкотемпературные атомные интерферометры, разрабатываются для высокоспециализированных испытаний и очень точных измерений, но эти разработки пройдут длинный путь пока укрепят свои позиции.

Большое продвижение применяемых систем должно быть сделано с точки зрения дальнейшего уменьшения в цене и сложности с соответствующим повышением надежности.

Реализация навигации от теории к практике.

Пример простой одномерной навигации подразумевает определение положения поезда (объекта), который движется между двумя точками на идеально плоской поверхности. Возможно, определить мгновенную скорость поезда и расстояние, которое он прошел от известной стартовой точки, применяя систему измерения его ускорения по всей длине пути. Датчики, называемые датчиками ускорения (акселерометры), дают информацию об их собственном движении. Если акселерометр установлен в поезде, то он будет давать информацию об ускорении поезда. Временной интеграл измерения ускорения дает непрерывную оценку мгновенной скорости поезда [4–7].

Вторичное интегрирование дает дистанцию, пройденную от известной стартовой точки. Акселерометр совместно с компьютером, либо другим, схожим устройством, составляет плоскую навигационную систему.

Обычно навигационные системы нуждаются в определении положения объекта относительно сетки координат или системы отсчета. Пример возможного определения позиции объекта представлен в декартовой системе координат. Рассматриваемый пример поступательно движущегося объекта представлен на рисунке 2, где координаты фигуры показывают позицию объекта.

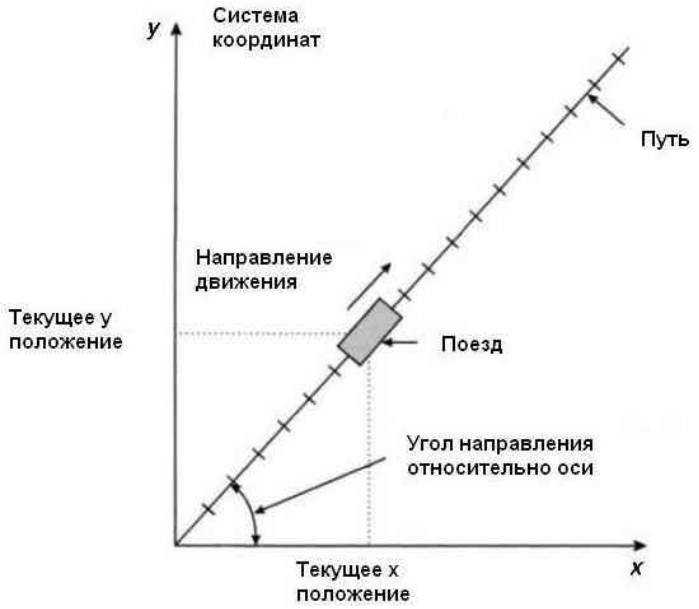


Рисунок 2– Одномерная навигация

С помощью координат x и y можно определить как движениеобъекта, так и его ускорение. Что является усовершенствованным представлением нахождения ускорения в координатах x и y, а также определения скорости объекта.

В этом простом случае угол на графике пути направление относительно оси X.

Более общая ситуация (рисунок 3) определяет где кривая пути имеет неизбежный дефект движения, который характеризует вертикальное смещение модели. Поэтому необходимо определить вращение объекта вдоль пути.

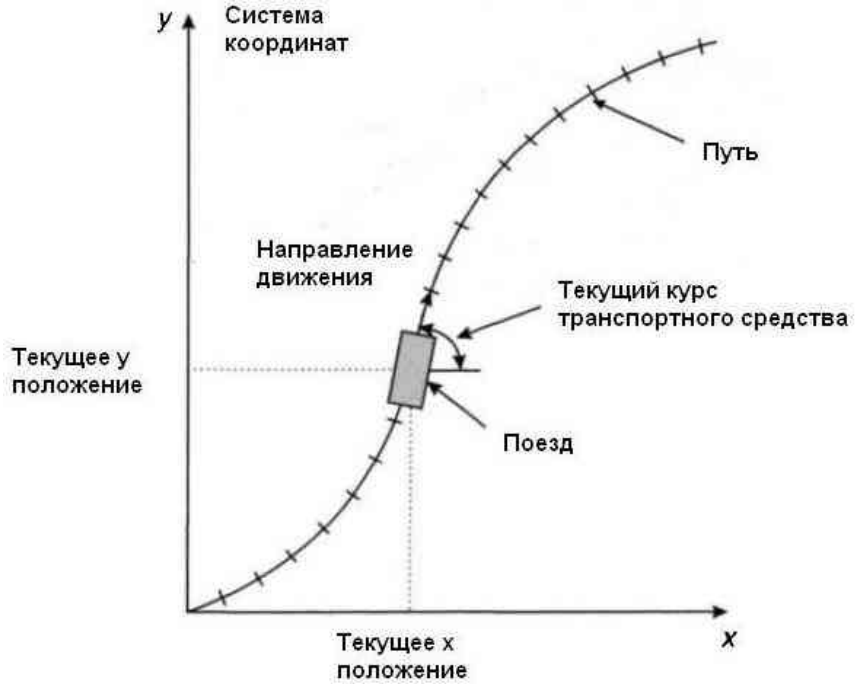


Рисунок 3 – Двумерная навигация

Одновременно требуется два акселерометра, чтобы определить направление поступательного движения перпендикулярно осям координат и перпендикулярно пути. Гироскоп – это сенсор, подходящий для измерения вращательного движения. В зависимости от формы конструкции этого датчика, он может быть использован для обеспечения определения любого прямого направления движения объекта относительно сетки координат или

определения угловой скорости объекта. В последнем случае угловые координаты положения объекта могут быть вычислены путем объединения этих измерений, определяющих угол, называемый начальным (стартовым) в навигации. Получение подобной информации возможно при соотношении измерений ускорения, позволяющих зафиксировать положение объекта относительно осей координат. Следовательно, мгновенные величины ускорения могут быть определены в координатах и проинтегрированы по времени, чтобы определить мгновенную скорость и положение объекта относительно координат.

В таком случае можно сконструировать двухкоординатную (на плоскости) навигационную систему, использующую гироскоп, два датчика движения и компьютер. Практически, вышеуказанные датчики монтируются на платформе, которая стабилизирована в пространстве и, следовательно, изолирована от вращательного движения объекта, или может быть установлена прямо на объекте, формирующего бесплатформенную систему. Измерения, произведенные в компьютере, обеспечивают непрерывное определение положения, скорости и направления пути или направления объекта. Это может быть ограничено тем, что инерциальная навигация в основном зависит от точного знания положения, скорости и направления предыдущей стартовой точки навигации (начальные условия). Все это потому, что используются вычисления траектории, которые опираются на операцию обновления предыдущих значений системы этих навигационных величин, начинающихся с инициализации показателей, входящих в систему на старте навигации.

Из выше сказанного, очевидно, что определение местоположения объекта может достигаться путем использования свойств специальных датчиков, устанавливаемых на этотобъект. В основном все это требует определения положения объекта относительно трехкоординатной сетки. Следовательно, если используются датчики на каждой оси, то требуются три гироскопа, чтобы обеспечить измерение угловой скорости транспорта вдоль трех отдельных осей, в то время как акселерометры позволяют определять компоненты ускорения, которые имеет объект относительно этих осей. Для удобства и точности эти три оси обычно выбираются взаимно перпендикулярными [1, 8, 9].

В большинстве случаев, установка оси определяется по соответствию совпадения оси датчика с осью объекта(БПЛА, ЗРК), в котором установлены датчики, именуемые обычно как установленные оси объекта. Измерения, обеспечиваемые с помощью гироскопов, используются для определения положения и направления объекта относительно координат, в которых требуется произвести навигацию. Информация о положении и направлении используется для нахождения измеренных ускорений относительно координатной сетки. Найденные ускорения могут быть дважды проинтегрированы для получения скорости и положения объекта, соответствующих координатах.

Гироскопы обеспечивают измерения изменений в положении объекта или его угловой скорости относительно инерциального пространства. Поэтому датчики ускорения нельзя отделять от общего ускорения объекта ускорением относительно инерциального пространства из-за наличия гравитационного поля. Эти датчики фактически обеспечивают нахождения разности между истинным ускорением в пространстве и ускорением, соответствующим гравитационному. Эта величина негравитационной силы на единицу массы, оказывающая давление на прибор, сокращенно именуется как “удельная сила”.

Отсюда измерения, найденные через датчики скорости, особенно вблизи объектов большого размера, таких как Земля, которые должны быть объединены со знанием о гравитационном поле объекта для того, чтобы определить ускорение транспортного средства относительно инерциального пространства. Используя эту информацию можно получить ускорение объекта относительно Земли.

Функция навигации используется путем объединения измерений вращений объекта удельной силы, со знанием гравитационного поля, чтобы вычислить величину позиции скорости и положения относительно предварительно определенной координатной сетки. Схематическое представление такой инерциальной навигационной системы (рисунок 4) [10–12].

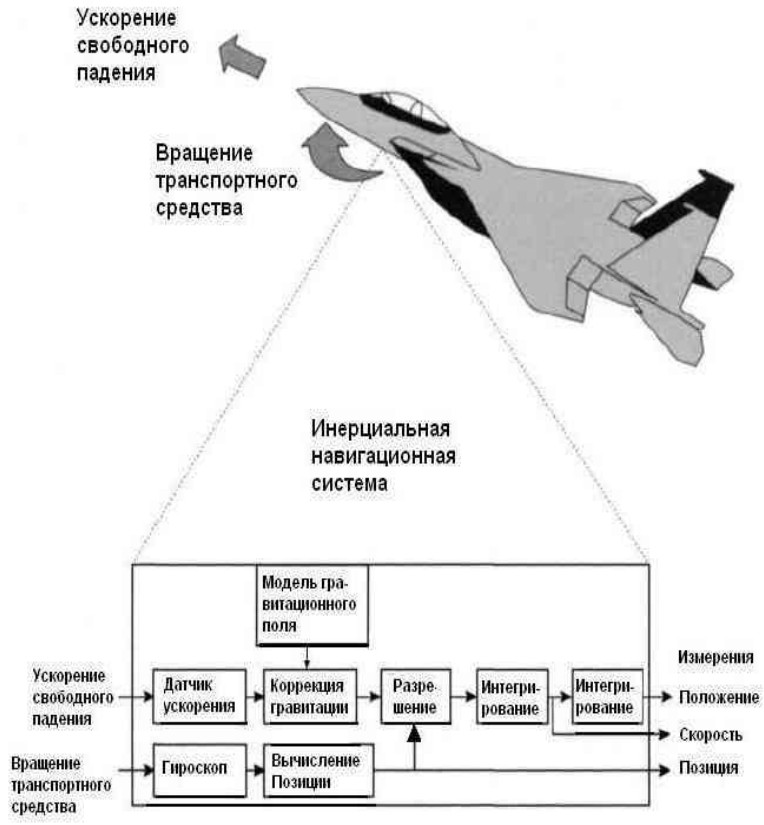


Рисунок4 – Функциональные компоненты инерциальной навигационной системы.

Основные выводы.

Исходя из изложенного следует, что основные функции, которые должна выполнять инерциальная навигационная система объекта (БПЛА, ЗРК) определяются следующим:

- определение углового движения объекта, используя гироскопические датчики, которые позволяют получить его позицию относительно сетки координат,
- измерение удельной силы, используя датчики ускорения,
- нахождение удельной силы, измеренной в координатной сетке с использованием знаний позиции, полученной изинформации считанной с гироскопов,
- определение результирующей силы с гравитационным полем- силой притяжения Земли из-за того, что система действует вблизи Земли,
- интегрирование измеренной удельной силы, чтобы получить значение скорости и положения транспортного средства.

Список литературы:

1. http://www.aerospace.honeywell.com./guidance-sensor-inertial-products. (дата обращения 17.10.2025).
2. http://www.usd.es.nortropgrumman/com. (дата обращения 17.10.2025).
3. http://www/sagem-ds/com. (дата обращения 17.10.2025).
4. Пешехонов В.Г. Гироскопия и навигация, № 1(72), 3 (2011).
5. Кузнецов А.Г., Измайлов Е.А. Труды ФГУП «НПЦ АП». Системы и приборы управления, №1, 3 (2012).
6. Линч Д. Гироскопия и навигация, № 3, 102 (2008).
7. Суханов С.В. Датчики и системы, № 11, 20 (2009).
8. Чиркин М.В., Устинов С.В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на лазерных гироскопах// Научный резерв. Рязань. – 2014. – №13 (32). С. 69 – 72.
9. Мишин В.Ю., Устинов С.В., Чиркин М.В. Влияние температуры газа на динамические характеристики плазмы в кольцевом гелий-неоновом лазере, определение порога развития

неустойчивости// Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – 2019. – С. 55 – 62.
10. Устинов С.В., Жустрин М.М., Чиркин М.В. Моделирование динамических характеристик газового разряда в кольцевом лазере// Межвузовский сборник научных трудов. – 2020. – №3. – С. 190 – 199.
11. Климаков В.В., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е., Чиркин М.В., Устинов С.В. Неустойчивость газового разряда в кольцевом лазере и эксплуатационная надежность лазерного гироскопа // XXXIII мульти-конференция. – Санкт-Петербург, 7-8 октября 2020 г. СПб.: АО «Кон-церн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2020. – С. 26 - 28.
12. Чиркин М.В., Устинов С.В., Кирьяков В.О. Бесплатформенные навигационные системы// Межвузовский сборник научных трудов. – 2021. – №8. – С. 371 – 374.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ И ЕЁ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРЕГРАДОЙ

Еремин И.А., Куприянов Ф.В.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В работе рассматриваются современные подходы к аналитическому моделированию процессов формирования кумулятивной струи, а также её высокоскоростного взаимодействия с преградой. Выполнен анализ физических моделей, описывающих обжатие металлической облицовки продуктами детонации, механизмы струеобразования, растяжения струи и её воздействие на преграду.

Термин «кумуляция» происходит от латинского cumulatio — «скопление» — и означает усиление эффекта за счет сложения однородных воздействий. В повседневной жизни это явление можно наблюдать, когда капля падает на поверхность воды: из массы жидкости вырывается струя. Этот же принцип, известный как гидродинамическая кумуляция, лег в основу создания мощных противотанковых боеприпасов, способных пробивать толстостенные преграды за счет колоссальной скорости струи. Гидродинамическая теория формирования кумулятивных струй и их действия по преграде, была предложена М.А. Лаврентьевым. Теория основана на модели идеальной несжимаемой жидкости [3].

Воздействие на преграду заряда взрывчатого вещества (ВВ) с конической полостью внутри может быть значительно усилено за счет облицовки полости тонким слоем твердого материала. Этот слой называют лайнером, а полый заряд с лайнером — кумулятивным зарядом. Моделирование образования кумулятивной струи основано на решении уравнений Навье-Стокса для двухфазных систем, которые описывают формирование кратера, его схлопывание под действием гидростатического давления и выброс узкой струи. Учитывается поверхностное натяжение, вязкость, сила тяжести, плотность жидкостей, а также число Вебера.

Уравнение Навье-Стокса:

$$\rho(\frac{\partial\vec{\upsilon}}{\partial t}+(\vec{\upsilon}\Delta)\vec{\upsilon})=-\nabla p+\nabla\tau+\vec{f}$$, где ρ — плотность материала, $\vec{\upsilon}$ — вектор скорости, p — давление, τ — тензор вязких напряжений, $\vec{f}$ — объемные силы.

Всё начинается с подрыва детонатора в точке инициирования (обычно в донной части заряда). Детонационная волна движется по заряду ВВ со скоростью 7–9 км/с (для типичных бризантных ВВ) и подходит к конической металлической облицовке [2]. Когда детонационная волна достигает вершины конуса облицовки, начинается её схлопывание. Под действием огромного давления предел прочности металла облицовки (меди, железа, тантала) многократно превышается. Металл ведет себя не как твердое тело, а как идеальная несжимаемая жидкость. Это ключевое допущение гидродинамической теории кумуляции. Элементы облицовки под давлением продуктов детонации начинают двигаться к оси симметрии заряда (рис. 1). В момент столкновения на оси возникает зона сверхвысокого давления. Металлу некуда деваться, кроме как двигаться вдоль оси. В результате столкновения образуются два принципиально разных потока: кумулятивная струя и основная масса металла [1]. Из-за того, что головная часть струи движется быстрее хвостовой, струя непрерывно удлиняется. Длина струи может в несколько раз превышать исходный диаметр облицовки. Это критически важно для глубины пробития, так как глубина пробития пропорциональна длине струи. Из-за

огромных скоростей и градиента скоростей струя может разрушаться на отдельные фрагменты. Наиболее правильный кумулятивный поток с наибольшим сжатием и с наиболее удалённым фокусом получается при определённом сферическом кумулятивном углублении. При конусном углублении поток менее сжат, фокусное расстояние также меньше [5].

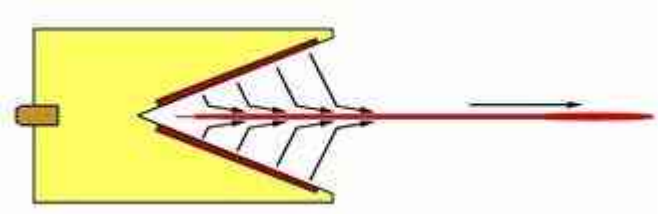


Рис. 1. Кумулятивный поток, образованный в результате столкновения элементов облицовки.

Гидродинамическая теория бронепробивания довольно хорошо описывает процесс внедрения кумулятивных струй в преграды, но при снижении скорости струй начинается заметное расхождение с экспериментом. В ней предложена модификация гидродинамической теории, учитывающая влияния прочности материала струи и преграды. В дальнейшем эта модификация развита с упором в основном на проникание бойков [3].

В системе координат, связанной с точкой контакта струи и преграды, справедливо уравнение Бернулли для двух потоков идеальной жидкости. Давление в точке встречи определяется плотностью струи и преграды, а также скоростью струи и скоростью углубления канала. Струя не плавит броню, а гидродинамически вытесняет (выдавливает) ее материал из зоны контакта в стороны и назад, образуя кратер. По мере углубления струя расходуется [7]. Распад струи на отдельные кусочки существенно меняет картину процесса по сравнению с проникание сплошной струи (даже с переменной скоростью по длине струи) и, в частности, снижает среднюю скорость проникания кумулятивной струи. Вполне возможно, что соударение между собой элементов разорванной струи при ее внедрении в преграду является одной из причин возникновения волнистой поверхности канала, в той его части, которая соответствует внедрению разорванной струи [3].

Среди параметров кумулятивной выемки наибольшее влияние на кумулятивное действие оказывают относительная высота выемки и угол при ее вершине. Форма выемки и материал облицовки заметно влияют на величину фокусного расстояния кумулятивного заряда. Также существует оптимальная толщина облицовки, при которой достигается максимальное бронепробивное действие. Для увеличения градиента скорости по длине струи применяют воронки переменной толщины. Еще одним фактором, резко снижающим кумулятивный эффект, является вращение кумулятивного заряда [8].

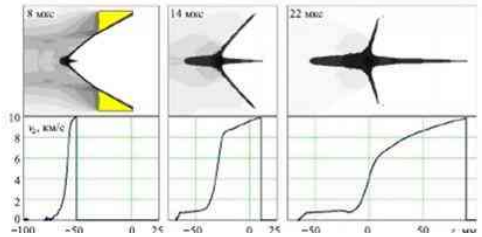


Рис. 2. Формирование кумулятивной струи зарядом с конической облицовкой прогрессивной толщины 1.4…2.6 мм.

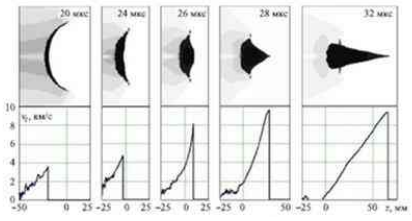


Рис. 3. Формирование кумулятивной струи зарядом с полусферической облицовкой дегрессивной толщины 2.4 мм/1.0 мм.

Полусферические облицовки дегрессивной толщины за счет имплозии повышают скорость струи и обеспечивают пробивное действие не ниже конических. Перспективны также полуэллипсоид и усеченная сфера [4].

Из исследованных материалов (алюминий, чистое железо, медь, тантал и вольфрам) медь и чистое железо являются лучшими материалами для лайнеров при формировании ударных ядер и удлиненных ударников. Сопоставление характеристик пяти использованных

материалов при расчетах с одним и тем же объемом лайнера или одной и той же массой показало, что наиболее подходящими для лайнеров являются материалы с хорошим динамическим удлинением и средней плотностью [6].

Кумулятивная струя — это сложный высокоскоростной процесс, в основе которого лежит перераспределение энергии от большей части к меньшей. Явление кумуляции нашло широчайшее применение не только в военном деле для поражения бронированных целей, но также для добычи полезных ископаемых, для промышленных целей таких как сварка взрывом, резка крупногабаритного металла. Уникальные параметры кумулятивной струи — экстремальные давления, температуры и скорости — делают её незаменимым инструментом в научных лабораториях. Так же кумулятивные струи могут представлять опасность для деталей машин совершенно в мирных ситуациях. Например, кавитационная эрозия. Это явление встречается в гидравлических системах — насосах, турбинах, корабельных винтах, в трубопроводах с интенсивным потоком жидкости. Изучение кумулятивных струй является важной задачей для фундаментальной науки. Это знание позволяет нам, как создавать новое, так и защищаться от разрушительных сил, будь то вражеский снаряд или коварный пузырек в трубопроводе.

Список литературы:

1. Буравова С.Н. Анализ процессов, сопровождающих цилиндрическую кумуляцию // Физика горения взрыва. — 2025. — №2. — С. 109-114.
2. А. Воеводка Т. Витковски. Моделирование формирования струи в линейных кумулятивных зарядах // Физика горения и взрыва. — 2014. — № 3. — С. 130-135.
3. Кинеловский С.А., Тришин Ю.А. Физические аспекты кумуляции [Электронный ресурс]. URL: https://www.sibran.ru/upload/iblock/2e9/2e9dbdc053f0c5acc6162ccffb26061f.pdf
4. Федоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М. Сравнительный анализ формирования кумулятивных струй из конических и полусферических облицовок // Наука и инновация. — 2018. — С. 1-13.
5. Шевцов Н.Р. Разрушение горных пород взрывом: монография. — 4-е изд., перераб. и доп. / Н.Р. Шевцов, П.Я. Таранов, В.В. Левит, А.Г. Гудзь. — Донецк: Триумф, 2003. — 253 с.
6. В.-Б. Ли, С.-М. Ван, Х. Чжоу. Влияние материала оболочки на форму пенетраторов, формируемых взрывом // Физика горения и взрыва. — 2015. — №3. — С. 112 -118.
7. Проникание кумулятивной струи в однородную преграду. [Электронный ресурс]. URL: https://studfile.net/preview/6332433/page:5/
8. Факторы, влияющие на кумулятивное действие. [Электронный ресурс]. URL: https://studfile.net/preview/7677532/page:29/

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИИ ТУК ПРИ МНОГОФАКТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Елагин Д. А.[1], Порошин Е. М.[2]

[1]Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров,

[2]ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Актуальность

После введения масштабных санкционных ограничений против Российской Федерации критически важной задачей стало обеспечение технологического суверенитета во всех высокотехнологичных отраслях, включая атомную энергетику и машиностроение. В этих условиях разработка и применение отечественного пакета программ «ЛОГОС» (входит в реестр отечественного ПО) становится стратегическим направлением.

Транспортно-упаковочные комплекты (ТУК) для отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) относятся к критически важным изделиям, требующим обязательного обоснования прочности и безопасности при многофакторных воздействиях (тепловых, аэродинамических, статических, динамических). Проведение натурных испытаний таких изделий чрезвычайно затратно, а в условиях санкционного давления – часто невозможно из-за отсутствия доступа к импортному испытательному оборудованию и измерительной технике [1–4].

Единственным жизнеспособным подходом становится полномасштабное цифровое моделирование с использованием методов вычислительной механики и отечественных программных средств. Разработка методологии проведения цифровых испытаний ТУК на базе

пакета «ЛОГОС» позволяет не только снизить стоимость и трудоемкость сертификации, но и обеспечить независимость от зарубежного программного обеспечения в стратегически важной атомной отрасли.

Цель работы – разработка методологии проведения цифровых прочностных испытаний конструкции ТУК при совместном действии тепловых, аэродинамических и статических нагрузок с использованием отечественного пакета программ «ЛОГОС».

Задачи:

– Анализ теоретических основ метода конечных элементов и метода контрольных объемов.

– Разработка упрощенной конечно-элементной модели ТУК.

– Выполнение сопряженного тепло-аэродинамического расчета.

– Проведение прочностного расчета с использованием полученных полей.

– Формулирование методологии цифровых испытаний.

Научная новизна.

Предложена методика сопряженного тепло-аэродинамического-прочностного расчета ТУК с использованием «Логос Платформа», отличающаяся передачей полей температур и давлений между несовпадающими расчетными сетками (конечно-объемной для тепло-аэродинамики и конечно-элементной для прочности) на одинаковом секторе модели (1/4) с применением циклического преобразования и интерполяции методом обратных расстояний

Практическая значимость – снижение стоимости и трудоемкости сертификационных испытаний ТУК, возможность обоснования прочности и безопасности конструкции в условиях санкционных ограничений, импортозамещение зарубежных CAE-систем.

Методология.

Расчет выполнен в сопряженной постановке «тепло – аэродинамика – прочность» с использованием метода контрольных объемов (тепло, аэродинамика) и метода конечных элементов (прочность). Программная реализация – пакет «ЛОГОС» версии 5.3.25 (модули «Логос Тепло», «Логос Аэродинамика», «Логос Прочность») и «Логос Платформа» для построения сценариев [5, 6].

Схема сопряженного расчета.

Разработан сценарий (рис. 1), включающий три основных модуля: «Связанный расчет» (аэродинамика + тепло), «Циклическое преобразование полей» (внешний скрипт), «Расчет прочности». Ключевая проблема – несовпадение расчетных сеток: тепловая задача решается на конечно-объемной сетке (600 000 элементов, 1/4 модели), прочностная – на конечно-элементной сетке (580 000 элементов, 1/4 модели). Модуль преобразования считывает EFR-файлы, интерполирует поля температуры и давления методом обратных расстояний с использованием k-d дерева, выполняет циклическое размножение (построение полных полей на основе 1/4) и экспортирует данные в формат, понятный модулю прочности.

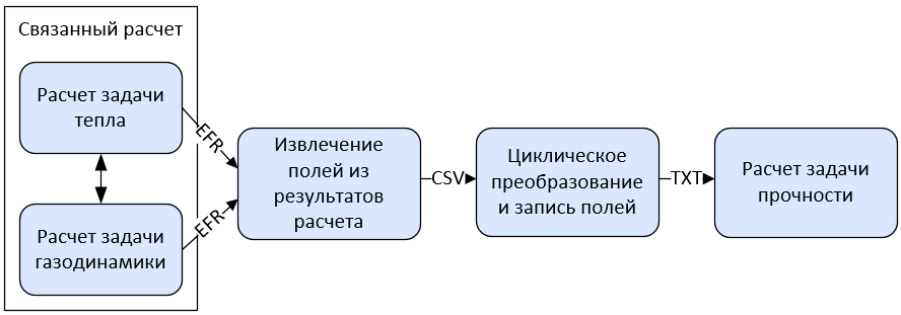


Рисунок 1 – Схема проведения сопряженного расчета тестовой модели.

Тепловая модель.

Для теплового расчета использована упрощенная CAD-геометрия с сохранением внешнего облика и оребрения. Тепловыделение от ТВЭЛ суммарной мощностью 21,6 кВт задано неравномерно распределенным тепловым потоком на внутренней поверхности оболочки (табл. 1).

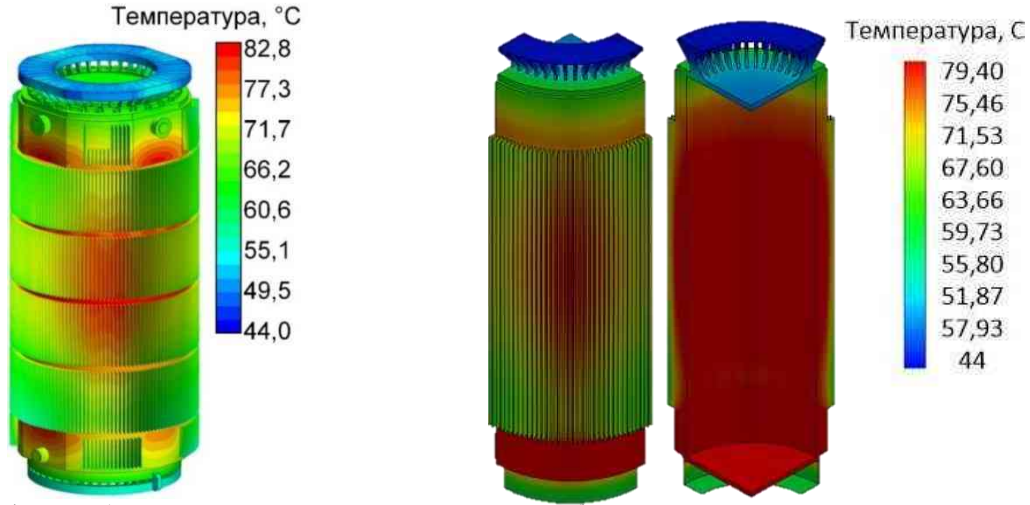
Таблица 1 – Распределение теплового потока

Высота h, м	Значение, Вт/м²
0 (днище)	2
0,62	207,6
4,57	$-111 \cdot h^2 + 530{,}12 \cdot h + 293{,}38$
5,32	56,9
5,32 (крышка)	8,2

Граничные условия – конвективный теплообмен.

Решалась стационарная задача теплопроводности: $\mathrm{div}(\lambda \mathrm{grad} T) + \rho Q_T = 0$

Сравнение с подробной моделью (рис. 2) показало отклонение максимальной температуры наружной поверхности не более 2,9 °С, а по высоте оребренной части – менее 3 °С, что подтверждает адекватность упрощенной модели.



а) подробная модель б) упрощенная модель

Рисунок 2 – Распределение температур по наружной поверхности ТУК

Прочностная модель.

Конечно-элементная модель построена на 1/4 конструкции с использованием гексаэдральных элементов. Закрепления: нижний демпфер зафиксирован по торцу ($Uz = 0$), на боковых гранях – условия симметрии. Механическая нагрузка – сосредоточенная сила P = 9000 Н под углом 45° в месте проушины (имитация усилия при транспортировке). Тепловая нагрузка – поля температур, интерполированные с тепловой сетки. Учтен собственный вес. Свойства материала (сталь): модуль упругости E = 200000 МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$, предел текучести $\sigma_{0,2} = 491$ МПа, коэффициент линейного теплового расширения $\alpha = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$ 1/°С.

Расчет выполнен в линейной термоупругой постановке.

Оценка прочности – по энергетическому критерию Мизеса (четвертая теория прочности).

Результаты совместного расчета.

На рис. 3 представлено поле результирующих перемещений U_{Sum}. Максимальное перемещение составляет 6,9 мм и локализуется в верхней части (зона верхнего демпфера и крышки) из-за совместного действия силы и теплового расширения. Перемещения в средней и нижней частях корпуса не превышают 3 мм.

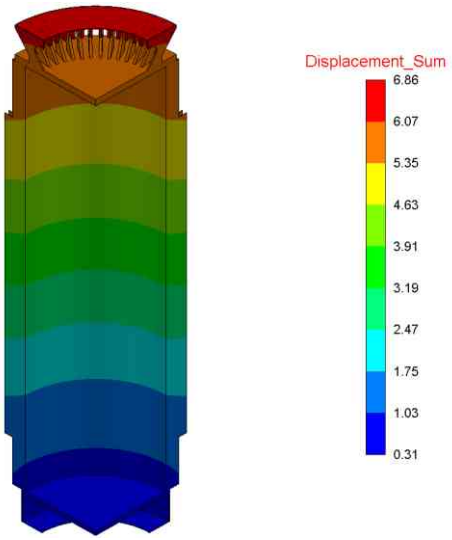


Рисунок 3 – Результирующие перемещения U_{Sum} конструкции ТУК, мм

На рис. 4 показана интенсивность эквивалентных напряжений по Мизесу. Максимальное значение $\sigma_i^{max} = 400{,}48$ МПа возникает в зоне перехода верхнего демпфера к цилиндрической обечайке – там наблюдается геометрический концентратор напряжений и градиент температур.

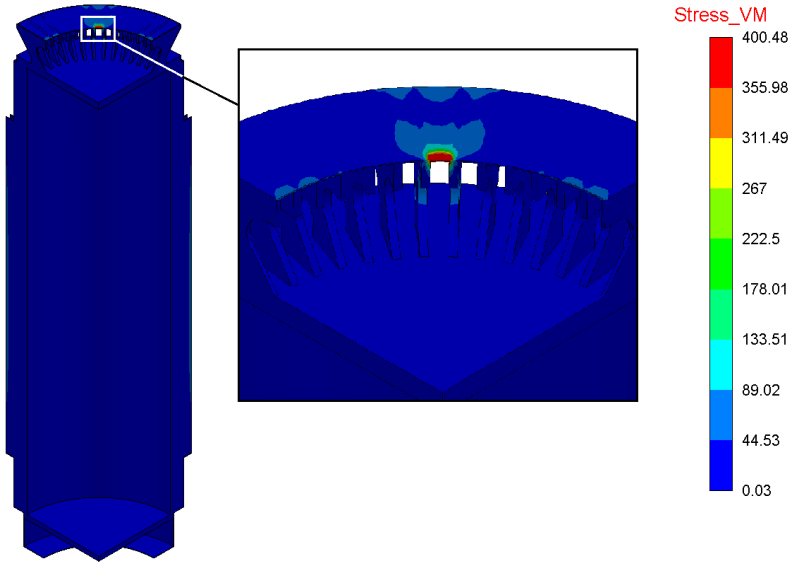


Рисунок 4 – Интенсивность напряжений по Мизесу σ_i, МПа

Запас прочности: $\eta_{0.2} = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_i^{max}} = \frac{491}{400{,}48} \approx 1{,}23$

Прочность деталей ТУК сохраняется.

Основные выводы:

Разработанная методология, базирующаяся исключительно на отечественном пакете «ЛОГОС», позволяет корректно передавать поля температур и давлений между несовпадающими сетками разных физических модулей, обеспечивая технологическую независимость от зарубежного ПО.

Упрощенные конечно-элементные модели обеспечивают приемлемую точность (отклонение температур ≤ 2,9 °C) при значительном снижении вычислительных затрат.

При совместном действии тепловыделения 21,6 кВт, силы P = 9000 Н и собственного веса максимальные напряжения не превышают предел текучести, запас прочности составляет 1,23.

Предложенный алгоритм может быть рекомендован для сертификационных цифровых испытаний ТУК и аналогичных конструкций, работающих в условиях многофакторного нагружения, как прямое импортозамещение зарубежных CAE-систем.

Список литературы:

1. НП-061-05. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования ядерной энергии. Дата введения 01.05.2006.
2. НП-053-04. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. Дата введения 01.05.2005.
3. МАГАТЭ. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. SSR-6. Вена, 2012.
4. Лисин Д.А., Долбищев С.Ф., Кожаев Л.Н., Бочин А.И., Блохина Е.В., Тюрин М.В., Кладов П.В. Транспортные упаковочные комплекты для безопасного транспортирования и хранения отработавшего ядерного топлива атомных электростанций. ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров
5. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин. Пакет программ «ЛОГОС», версия 5 (ЛОГОС ПРОЧНОСТЬ), ЭВМ рег. № 489 от 19.12.2019.
6. Каныгин И.И, Абдуллин М.Ф., Барабанов Р.А., Еременко А.Ю., Кварацхелия Д.Д, Косарим С.С., Наумов А.О., Филимонкин Е.А., Циберев К.В., Юлин А.В., Юносова В.А. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач статической прочности. ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МНОГОСЕТОЧНОГО МЕТОДА НА ПРИМЕРЕ ОДНОМЕРНЫХ ЗАДАЧ

Морозов Е. П., Замарашкин Н. Л.
Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Саров

Введение

В современных задачах математического моделирования тепловых процессов, особенно в рамках мультифизичных расчётов, критически важны два параметра: физическая точность аппроксимации и вычислительная эффективность алгоритма. Особый интерес представляют процессы лучистой теплопроводности, возникающие при высокотемпературных режимах, где коэффициент теплопроводности обладает сильной нелинейной зависимостью от температуры. При использовании подробных пространственных сеток стандартные итерационные методы решения возникающих систем линейных уравнений демонстрируют резкое падение скорости сходимости, что делает расчёты чрезмерно затратными.

Целью данной работы является повышение быстродействия решения нелинейного уравнения теплопроводности за счёт внедрения геометрического многосеточного метода [1–3]. В докладе будут рассмотрены математическая постановка задачи, особенности численной дискретизации, алгоритмическая реализация многосеточного V-цикла, а также результаты верификации на аналитическом тесте Самарского–Соболя [4].

Основная часть

В задачах математического моделирования тепловых процессов с сильной зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры важны как точность расчёта, так и вычислительная стоимость при использовании подробных пространственных сеток. Для повышения быстродействия решения нелинейного уравнения теплопроводности в одномерной постановке в работе применяется геометрический многосеточный метод в форме V-цикла совместно с чисто неявной схемой. Рассматривается одномерное уравнение без источников при нормировке параметров, при которой в качестве модели коэффициента теплопроводности используется степенная зависимость от температуры (лучистая теплопроводность). Постановку удобно записать в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\chi(T)\,\frac{\partial T}{\partial x}\right), \qquad \chi(T) = \chi_0 T^{\beta},$$

где в численном эксперименте задавались значения $\chi_0 = 6$ и $\beta = 3$. На границах задавались условия Дирихле, слева — постоянный поток температуры в согласовании с параметром $c = 4$, справа — нулевая температура, начальное условие — нулевая температура по отрезку. Для проверки схемы используется тестовая конфигурация Самарского — Соболя [4], для которой известно аналитическое решение в виде распространяющегося фронта:

$$T(x,t) = \begin{cases} \dfrac{\beta c\,(ct - x)}{\chi_0}, & x < ct, \\ 0, & x \geq ct. \end{cases}$$

Дискретизация по пространству выполнялась на равномерной сетке с использованием чисто неявной аппроксимации с пересчётом нелинейности по итерациям. Возникающие на каждом слое линеаризованные системы с трёхдиагональной структурой решались геометрическим многосеточным V-циклом со сглаживанием Якоби. Перенос полей между уровнями сетки реализован с помощью весовой интерполяции и кубических сплайнов в духе работ по многосеточным методам для уравнений диффузионного типа [5], но в работах по типу [5] используется только линейная интерполяция, а также простая реализация многосеточного цикла. На самом грубом уровне для малых размерностей применялось точное решение малых систем (например, LU-разложение).

При анализе сходимости ошибку итерационного процесса удобно представлять в виде дискретного ряда Фурье по модам с различными длинами волн на сетке. Типичные сглаживатели, в том числе Якоби и Гаусса — Зейделя, быстро подавляют коротковолновые компоненты ошибки (масштаба порядка шага сетки), но слабо уменьшают длинноволновые. На более грубой сетке те же длинноволновые составляющие относительно её шага выступают уже как коротковолновые и подвергаются эффективному гашению сглаживанием на этом уровне. Иерархия вложенных сеток позволяет последовательно устранять ошибку на разных масштабах, что и составляет содержательную основу многосеточного ускорения [1-3].

На рисунке 1 приведена зависимость времени счёта и ускорения при подключении многосеточного решателя по сравнению с прямым методом от числа ячеек сетки. При увеличении числа узлов выигрыш по времени становится наиболее заметным, что согласуется с ожидаемым снижением трудоёмкости итерационного решения больших систем относительно прямого метода на мелкой сетке.

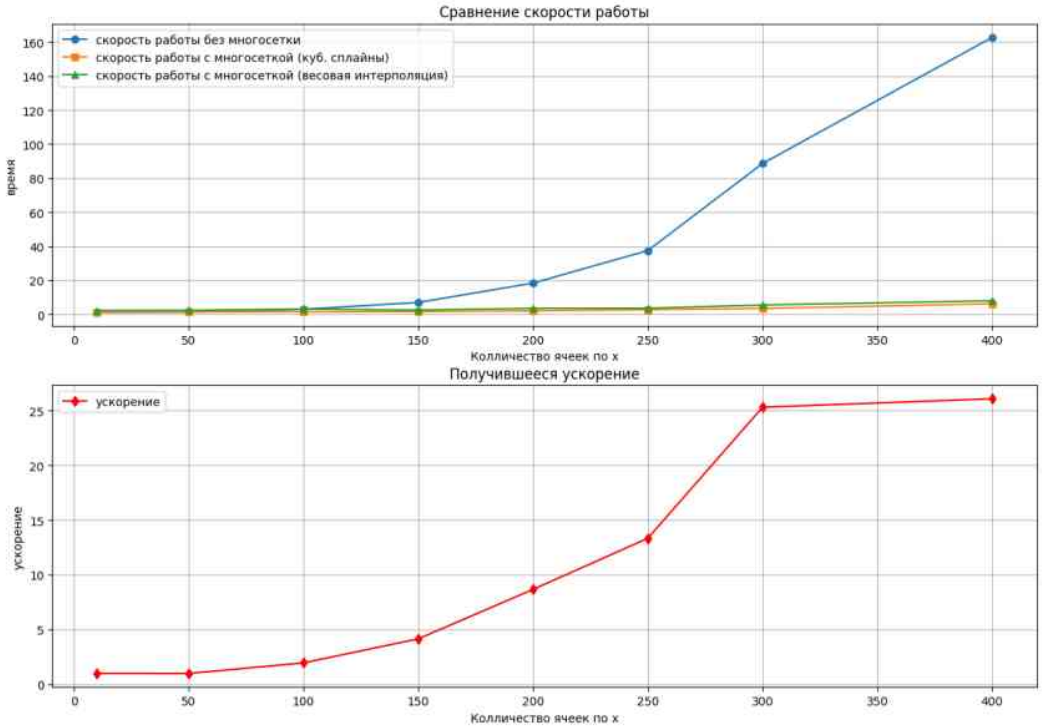


Рисунок 1 – Время работы алгоритмов с многосеточным решателем и без него и полученное ускорение в зависимости от числа ячеек.

Заключение

Подводя итоги, можно констатировать, что в ходе работы был успешно разработан и программно реализован численный алгоритм решения нелинейного уравнения теплопроводности с применением геометрического многосеточного метода. Интеграция чисто неявной схемы, итерационной линеаризации нелинейности и V-цикла с Якоби-сглаживанием

позволила создать устойчивый решатель, демонстрирующий высокую скорость сходимости на подробных пространственных сетках. Ключевым результатом является подтверждение того, что многосеточный подход обеспечивает существенное ускорение расчётов без деградации точности, что делает его перспективным инструментом для моделирования процессов лучистой теплопроводности в составе комплексных мультифизичных кодов. Метод обладает оптимальной асимптотической сложностью, хорошо масштабируется и легко адаптируется под различные типы граничных условий.

В дальнейшей перспективе планируется перенос разработанного алгоритма на двумерные и трёхмерные постановки, исследование эффективности других типов сглаживателей (например, Gauss–Seidel или ILU), а также оптимизация кода для параллельных вычислительных архитектур с использованием технологий OpenMP и MPI.

Список литературы:

1. Ольшанский М. А. Лекции и упражнения по многосеточным методам. М.: Физматлит, 2005. 168 с.
2. Hackbusch W. Multi-grid methods and applications. Berlin: Springer, 1985.
3. Brandt A. Multi-Level Adaptive Solutions to Boundary-Value Problems // Mathematics of Computation. 1977. Vol. 31, no. 138. P. 333–390.
4. Самарский А. А., Соболь И. М. Примеры численного расчёта температурных волн // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1963. Т. 3, № 4. С. 702–719.
5. Ладонкина М. Е., Милюкова О. Ю., Тишкин В. Ф. Численный метод решения уравнений диффузионного типа на основе использования многосеточного метода // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2010. Т. 50, № 8. С. 1438–1461.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТОКОВ НА ПЛАСТИНЕ ПРОЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ ГАЛЕРКИНА С RWG БАЗИСНЫМИ ФУНКЦИЯМИ

Панов П.А., Сетуха А.В.
Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Саров

Введение

Рассеяние электромагнитных волн на идеально проводящих телах и экранах - одна из ключевых задач прикладной электродинамики. Она востребована в радиолокации, антенной технике, проектировании систем электромагнитной совместимости и стелс-технологиях. Особый интерес представляют объекты с разомкнутыми поверхностями (экраны), а также с разрезами и щелями, поскольку такие дефекты существенно влияют на рассеянное поле.

Цель работы реализовать численное исследование поверхностного электрического тока, индуцированного на системе идеально проводящих тел и экранов с разрезами и щелями при внешнем монохроматическом облучении.

На текущем этапе реализован базовый алгоритм для сплошного экрана без дефектов. Задача сведена к интегро-дифференциальному уравнению относительно поверхностного тока, которое решается методом Галеркина с векторными базисными функциями типа RWG на триангулированной поверхности.

Постановка задачи

Пусть Σ - суммарная поверхность облучаемых объектов. Эта поверхность может состоять из одной или нескольких компонент: замкнутых (это относится к идеально проводящим телам) и разомкнутых для экранов. Тогда при решении задачи рассеяния ищется полное поле E_{tot}, возникающее при взаимодействии некоторого заданного первичного поля E_{inc} с рассматриваемым телом, помещенным во внешнюю среду. При этом полное поле ищется в виде:

$$E_{tot} = E_{inc} + E_{scat}, \quad (12)$$

где E_{scat} - неизвестное вторичное(рассеянное) поле. Предполагается, что первичное поле создается сторонними источниками.

С математической точки зрения под идеальным проводником понимается тело(экран), на поверхности которого касательная компонента полного электрического поля является нулевой. Таким образом на поверхности Σ ставится граничное условие:

$$n \times E_{tot} = 0, \qquad (2)$$

здесь n – орт вектора нормали на поверхности Σ.

Таким образом, ставится задача нахождения вторичного электрического поля E_{scat}.

Вторичное поле будем искать в виде[1]:

$$E_{scat}(x) = \frac{i}{\omega\varepsilon}\int_{\Sigma}\left(grad_x div_x\left[j(y)F(x-y)\right] + k^2 j(y)F(x-y)\right)d\sigma_y \,, \quad (3)$$

Здесь $F(x-y) = \dfrac{e^{ik|x-y|}}{4\pi\,|\,x-y\,|}$ - функция Грина, k - волновое число, ω - угловая частота.

Оно должно удовлетворять вне поверхности Σ условию излучения:

$$\vec{E} \to 0, \quad \frac{\partial \vec{E}}{\partial r} - ik\vec{E} = o\left(\frac{1}{r}\right), \quad \text{при } r \equiv |\,x\,| \to \infty$$

и векторному уравнению Гельмгольца:

$$\Delta\vec{E} + k^2\vec{E} = 0,$$

где $k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$

Тогда с учетом граничного условия (2), выражение полного поля (1) и формулы (3) получаем интегро-дифференциальное уравнение на поверхности Σ относительно неизвестного поверхностного тока j:

$$\frac{i}{\omega\varepsilon}n(x)\times\int_{\Sigma}\left(grad_x div_x\left[j(y)F(x-y)\right] + k^2 j(y)F(x-y)\right)d\sigma_y = -n(x)\times E_{inc}(x), \quad (4)$$

$x \in \Sigma$.

Аппроксимация тока.

Ток будем аппроксимировать с помощью базисных функций e_i типа RWG(Rao-Wilton-Glisson) [2]:

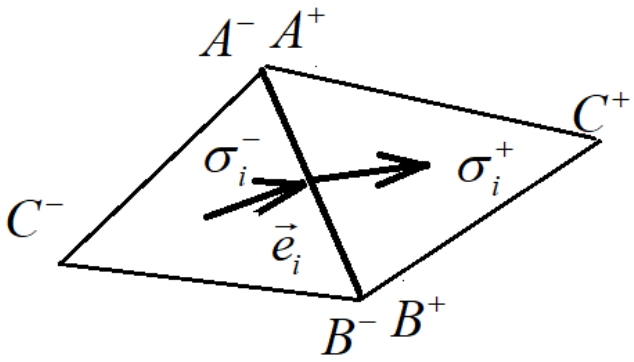


Рисунок 1

$$\vec{J}(y) \approx \sum_{i=1}^{N} j_i \vec{e}(y),$$

здесь j_i - коэффициенты разложения.

Удобно начать наше построение с замечания, что каждая базисная функция должна быть связана с внутренним ребром (т.е. негранничным ребром, см. рис. 1) модели и обращаться в ноль везде на Σ, кроме двух треугольников, примыкающих к этому ребру. Два таких треугольника σ_i^+ и σ_i^-, соответствующих i-му ребру триангулированной поверхности.

Определим векторную базисную функцию, связанную с i-м ребром, как:

$$\vec{e}_i(y) = \begin{cases} -\dfrac{C^- - y}{S_i^-}, y \in \sigma_i^- \\ \dfrac{C^+ - y}{S_i^+}, y \in \sigma_i^+ \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$$

Представлены некоторые свойства, которые делают её уникально подходящей для нашей задачи:

1.

$$\vec{e}_i^{\pm} \cdot \vec{V}^{\pm} = 0.$$

Ток не имеет компоненты, нормальной к границе (которая не включает общее ребро) поверхности, образованной парой треугольников σ_i^+ и σ_i^-, поэтому вдоль этой границы не возникает линейных зарядов и поток через него равен нулю.

2.

$$\vec{e}_i^- \cdot \vec{V}^- = \vec{e}_i^+ \cdot \vec{V}^+ = \frac{2}{|AB|}.$$

Компонента тока, нормальная к общему ребру, постоянна и непрерывна поперёк ребра. Этот результат вместе с п. 1) означает, что все рёбра σ_i^+ и σ_i^- свободны от линейных зарядов, а ток перетекает от отрицательной ячейки к положительной строго по общему ребру.

3. Поверхностная дивергенция e_i, которая пропорциональна плотности поверхностного заряда, связанной с базисным элементом, равна

$$Div\vec{e}_i(x) = \begin{cases} \dfrac{2}{S_i^-}, x \in \sigma_i^- \\ -\dfrac{2}{S_i^+}, x \in \sigma_i^+ \end{cases}$$

Таким образом, плотность заряда постоянна в каждом треугольнике, полный заряд, связанный с парой треугольников σ_i^+ и σ_i^-, равен нулю.

Метод Галеркина.

Определим оператор K:

$$K[\Sigma, j](x) = \nabla \int_{\Sigma} F(x-y)(\nabla \cdot j(y))d\sigma_y + k^2 \int_{\Sigma} j(y)F(x-y)d\sigma_y,$$

Тогда умножив (4) на пробную функцию e_i с учетом, введенного скалярного произведения

$$(\vec{f}, \vec{g}) = \int_{\Sigma'} \vec{f}(y) \cdot \vec{g}^*(y)dy,$$

где Σ' - аппроксимация поверхности Σ,

получаем СЛАУ:

$$\frac{i}{\omega\varepsilon} \sum_{k=1}^{N} a_{ik} j_k = f_i, \quad i = 1,...,N, \quad (5)$$

где $a_{ik} = (K[\Sigma', \vec{e}_k], \vec{e}_i), \quad f_i = -(\vec{E}_{inc}, \vec{e}_i).$

Для решения СЛАУ требуется вычислить вектор правых частей f_i и матричные элементы a_{ik}.

С учетом п.3 a_{ik} можно вычислить, как

$$a_{ik} = \sum_{p,q=1}^{2} \frac{(-1)^{p+q}}{S_i^{\,p} S_k^{\,q}} \left\{ \int_{\sigma_i^{\,p}} \int_{\sigma_k^{\,q}} \left(-4 + k^2 (x - C_i^{\,p})(x - C_k^{\,q})\right) \left(\int_{\sigma_k^{\,q}} \frac{1}{4\pi r} dy \right) dx + \right.$$

$$\left. + \int_{\sigma_k^{\,q}} \int_{\sigma_i^{\,p}} \left(\frac{k^2 (x - C_i^{\,p})(y - x)}{4\pi r} + \left(-4 + k^2 (x - C_i^{\,p})(y - C_k^{\,q})\right) \frac{e^{ikr} - 1}{4\pi r} \right) dy dx \right\},$$

здесь $\sigma_i^1 = \sigma_i^-$, $\sigma_i^2 = \sigma_i^+$, S_i^1, S_i^2 – площади треугольников σ_i^1, σ_i^2 соответственно, C_i^1, C_i^2 – противолежащие вершины этих же треугольников.

Вектор правых частей f_i вычисляется по следующей формуле:

$$f_i = -\left(\vec{E}_{inc}, \vec{e}_i\right) = \frac{1}{S_i^-} \int_{\sigma_i^-} \vec{E}_{inc}(x) \cdot \left(C_i^- - x\right) dx - \frac{1}{S_i^+} \int_{\sigma_i^+} \vec{E}_{inc}(x) \cdot \left(C_i^+ - x\right) dx.$$

Задание первичного поля.

Требуется задать падающую плоскую волну $\vec{E}_{inc}$ В частотной области волна выражается следующим образом:

$$\vec{E}_{inc} = \vec{E}_0 e^{i\left(\vec{k} \cdot x\right)},$$

где $\vec{k} = k\vec{k}_0,\ |\vec{k}_0| = 1,\ \vec{E}_0 \perp \vec{k}_0.$

Для инициализации вектора $\vec{k}_0$ задается угол места θ и азимут ϕ:

$$\vec{k} = k\left(\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta\right).$$

Вектор $\overrightarrow{E_0}$ можно определить двумя способами: параллельная поляризация и перпендикулярная поляризация.

Параллельная поляризация:

$$\vec{E}_0' = \vec{k}_0 \times \vec{e}_z, \quad \vec{E}_0^{\,p} = \frac{\vec{E}_0'}{|\vec{E}_0'|}.$$

Перпендикулярная поляризация:

$$\vec{E}_0^{\,v} = \vec{k}_0 \times \vec{E}_0^{\,p}.$$

Результаты вычислений поверхностных токов $\vec{J}(y)$.

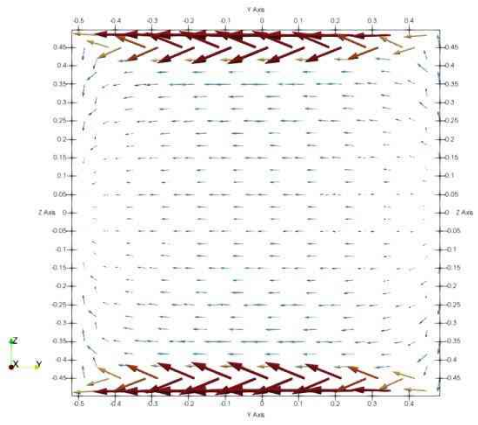


Рисунок 2. Поверхностные токи, действительная часть

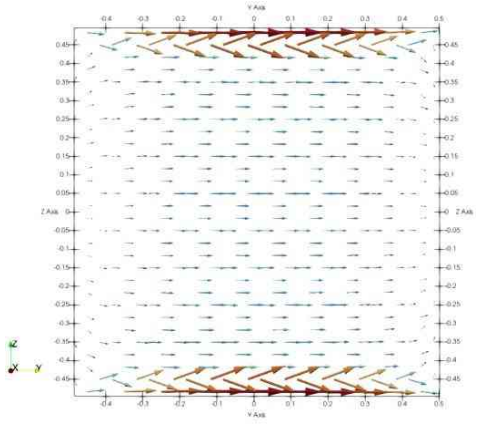


Рисунок 3. Поверхностные токи, мнимая часть

Для того, что перейти к более сложной поверхности и смоделировать разрезы на пластине, достаточно “удалить” базисные функции на тех ребрах, где будет присутствовать дефект.

***Список литературы*:**
1. А.В. Сетуха. Метод интегральных уравнений в математической физике. МГУ им.М.В.Ломоносова. 2023
2. Electromagnetic Scattering by Surfaces of Arbitrary Shape SADASIVA M. RAO, DONALD R. WILTON, SENIOR MEtmER, IEEE, AND ALLEN w. GLISSON, MEMBER, IEEE, 1982

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ НА ТВЕРДОМ ЦИЛИНДРЕ

Головизнин В.М., Козлов Н.М., Попова Н.Н.
Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Саров

В настоящей работе было проведено численное моделирование двумерного уравнения акустики, записанного в форме Даламбера, с помощью разностной схемы КАБАРЕ [1]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) \qquad (1)$$

Распространённые методы решения уравнения акустики: FDTD [2], МКЭ [3] и метод граничных уравнений [4] – требуют особого внимания при моделировании граничных условий свободного выхода. В отличие от них, схема КАБАРЕ, основанная на балансно-характеристическом подходе, позволяет естественным образом формулировать эти условия непосредственно через инварианты Римана, задаваемые в качестве входящих характеристических условий, что значительно упрощает расчёт.

В качестве модельной задачи была использована следующая математическая постановка: в центре прямоугольной области находится твёрдое цилиндрическое тело. На нижнюю границу приходит плоская акустическая волна, распространяющаяся вдоль оси y. На вертикальных границах области – условия свободного выхода, реализованные через решение одномерной характеристической задачи. При таком подходе вторичные волны, появившиеся при рассеянии на твёрдом теле, беспрепятственно покидают расчётную область. Требуется рассчитать процесс рассеяния падающей волны на плоском цилиндре. Математическая постановка представлена на рисунке 1.

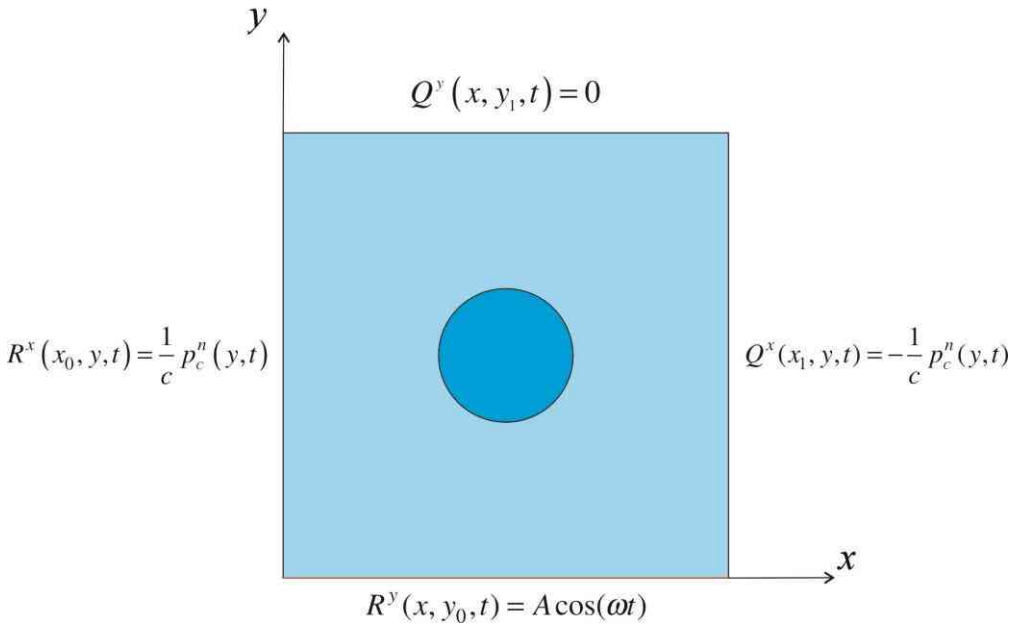


Рисунок 1 – Математическая постановка задачи о рассеянии плоской акустической волны на твёрдом цилиндре с помощью схемы КАБАРЕ

Поскольку в работе используется декартовая сетка, аппроксимация криволинейной границы цилиндра происходит ступенчатым образом. На гранях этой ступенчатой аппроксимации задаётся условие непротекания:

$$\left.\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right|_{\Gamma} = 0, \qquad (2)$$

где Γ – поверхность твёрдого цилиндра. Условие (2) фактически означает обнуление нормальных компонент потоковых переменных, определяемых как пространственные производные от φ на границе.

Проведённое моделирование показало, что в ближней зоне рассеяния на границе цилиндра возникают коротковолновые паразитные шумы, связанные с огрублением геометрии. В то же время, вдали от рассеивателя решение демонстрирует устойчивую и физически достоверную картину рассеянного поля.

Список литературы:

1. Головизнин В. М. Разностная аппроксимация конвективного переноса с пространственным расщеплением временной производной / Головизнин В. М., Самарский А. А. // Математическое моделирование. — 1998. — Т. 10, № 1. — С. 86–100.
2. Taflove A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. 3rd ed. / Taflove A., Hagness S. C. Boston: Artech House, 2005. 1006 p.
3. Левин М. П. Использование метода конечных элементов для расчета двумерных акустических полей, излучаемых из открытого конца канала / Левин М. П., Осипов А. А., Ширковский И. А. // Акустический журнал. — 1982. — Т. 28, № 2. — С. 250–257.
4. Использование метода граничных элементов при решении уравнения Гельмгольца для задачи акустики / Сивак С. А., Рояк М. Э., Ступаков И. М. [и др.] // Информационно-управляющие системы. — 2021. — № 2. — С. 13–19.

ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ КОНДЕНСИРОВАННЫХ УГЛЕКИСЛОТЫ И АММИАКА ПРИ МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Ботин Д.Г.[1,2], Маслов Д.А.[1,2], Козабаранов Р.В.[1,2]

[1]Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров,
[2]ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

В рамках данной работы изучались свойства конденсированных углекислоты и аммиака при мегабарных давлениях, а именно измерялась комплексная диэлектрическая проницаемость этих веществ с дальнейшим расчётом величины поляризуемости. Изучение свойств при экстремальных условиях важно для областей геофизики, астрофизики и физики планет-гигантов, в частности, поскольку в этих планетах содержатся химические элементы системы C-H-O-N.

Основным инструментом исследования является магнитокумулятивный генератор сверхсильного магнитного поля МК-1. Он позволяет получать мегабарные давления (вплоть до 5 Мбар и выше) и изучать вещества в процессе их изоэнтропического сжатия магнитным полем генератора [1]. В экспериментах с генератором МК-1 также производится гаммаграфирование (в качестве источника используются 3 бетатрона, срабатывающие в разные установленные моменты времени) для измерения размеров камеры сжатия, в которую помещается исследуемый образец, и косвенного измерения давления, что позволяет получать уравнения состояния веществ при экстремальных давлениях [2].

Для экспериментов по изоэнтропическому сжатию образцов в генераторе МК-1 была разработана и отработана схема измерения диэлектрической проницаемости и проводимости сжатых веществ. В состав схемы входят: двухканальный генератор произвольных сигналов RIGOL DG4202, цифровой осциллограф высокого разрешения; дифференциальный усилитель с повторителем на базе ОУ; полосовой фильтр Чебышева третьего порядка с разделительным трансформатором; кабельные сборки; камера сжатия, помещающаяся в соленоид генератора МК-1. Частота зондирующего сигнала – 50 МГц, амплитуда – порядка 1 В.

Структурная схема измерения показана на рис. 1.

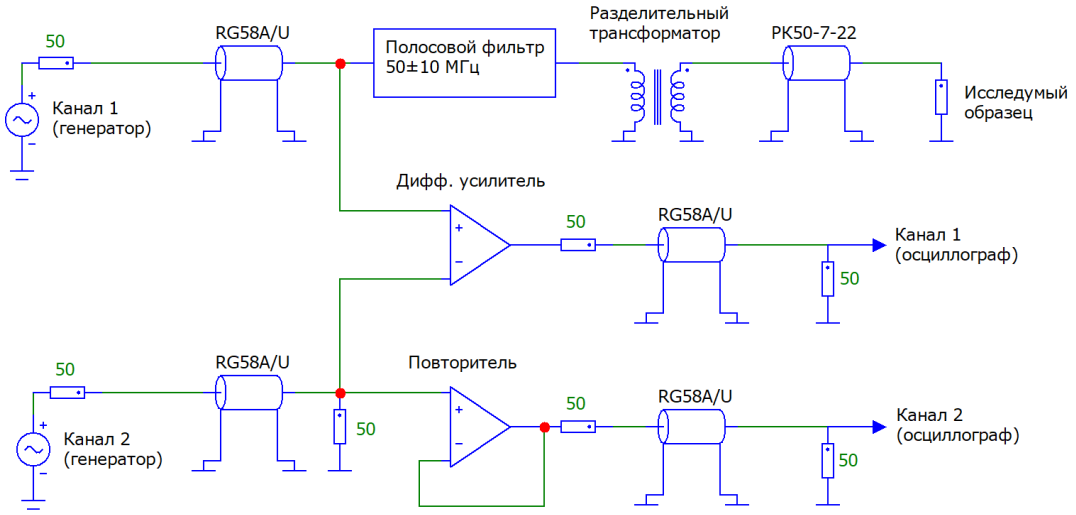


Рис. 1. Высокочастотная схема измерения проводимости.

На каналах осциллографа регистрируются падающая на нагрузку и отражённая от неё волны, что позволяет определить импеданс исследуемой нагрузки, и, следовательно, проводимость и диэлектрическую проницаемость исследуемого образца при известных геометрических параметрах камеры сжатия.

На рис. 2 представлена упрощённая геометрия коаксиальной камеры сжатия, которая выступала в качестве нагрузки в схеме измерения проводимости и диэлектрической проницаемости. Камеру сжатия можно представить в виде нескольких составных частей (рис. 2, слева направо):

1) ввод, заполненный диэлектриком (фторопласт-4);
2) первая несжимаемая область, заполненная исследуемым образцом;
3) область сжатия, соответствующая области усиленного магнитного поля генератора МК-1;
4) вторая несжимаемая область, заполненная исследуемым образцом;
5) хвостовая часть камеры сжатия.

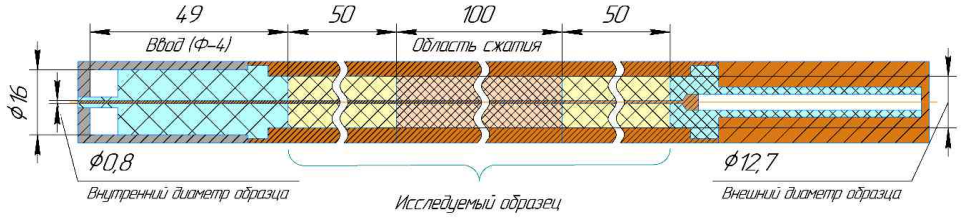


Рис. 2. Упрощённая геометрия коаксиальной камеры сжатия для исследуемого образца.

Были проведены измерения удельной проводимости и диэлектрической проницаемости конденсированных углекислоты и аммиака при их изоэнтропическом сжатии в генераторе МК-1. На рис. 3, 4 представлены полученные графики зависимостей удельной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости этих веществ от времени.

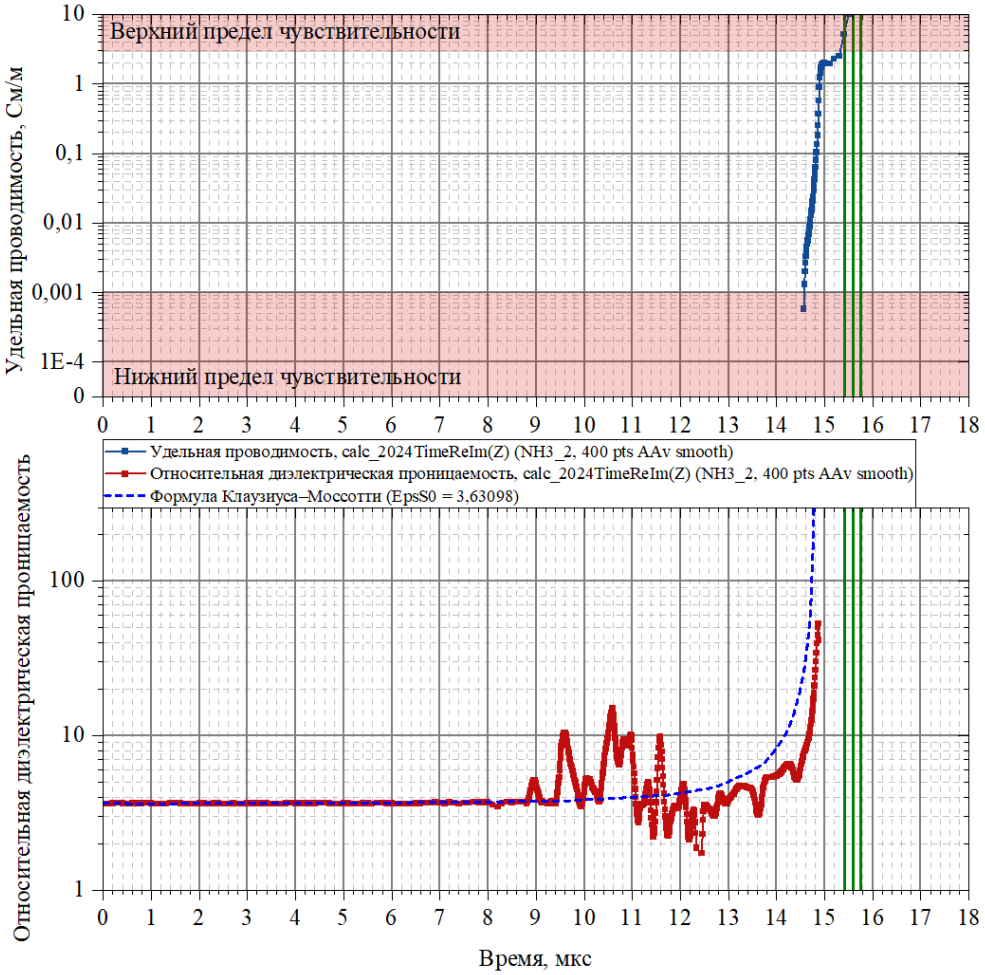


Рис. 3. Графики зависимости удельной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости конденсированного аммиака от времени в эксперименте с МК-1. Вертикальные пунктирные линии указывают времена срабатывания бетатронов.

По формуле Клаузиуса-Моссотти может быть вычислена поляризуемость для неполярных диэлектриков [3] (в данной работе – углекислоты):

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{N\alpha}{3\varepsilon_0},$$

где ε –диэлектрическая проницаемость, α – поляризуемость, N – число молекул в единице объёма, ε_0 – электрическая постоянная.

Формула Дебая-Ланжевена позволяет учитывать влияние температуры, и может быть вычислена поляризуемость для полярных диэлектриков (в данной работе – аммиака):

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{N}{3\varepsilon_0}\left(\alpha_0 + \alpha_{\text{дип}}\right),$$

где α_0 – поляризуемость отдельной молекулы (деформационная), $\alpha_{\text{дип}} = p_0^2 / 3kT$ – поправка на поляризуемость с учётом температуры, p_0 – дипольный момент молекулы.

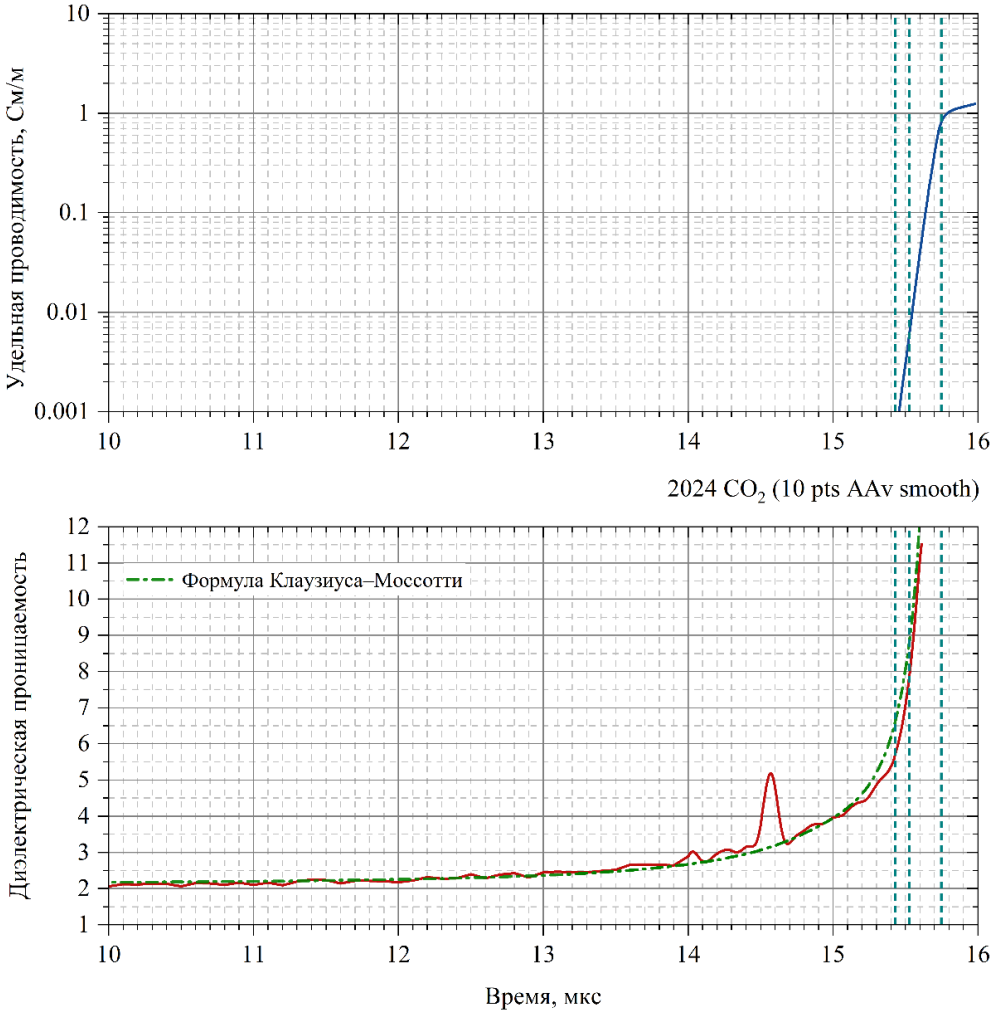


Рис. 4. Зависимость проводимости и диэлектрической проницаемости конденсированной углекислоты от времени в эксперименте с МК-1. Вертикальные пунктирные линии указывают времена срабатывания бетатронов.

На рис. 5 представлены вычисленные величины поляризуемости для углекислоты и аммиака в зависимости от степени сжатия – отношения объёмов в начальном и сжатом состояниях, соответственно, по формулам Клаузиуса-Моссотти и Дебая-Ланжевена – эффективные поляризуемости. Также приведены табличные значения деформационной поляризуемости веществ.

На основе полученных графиков можно сделать вывод, что эффективная поляризуемость углекислоты согласуется с табличным значением поляризуемости, а расхождение величин аммиака можно объяснить тем, что табличное значение приводится для отдельной молекулы, а реальное вещество образуют их множество.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 7 «Исследования в сильных и сверхсильных магнитных полях».

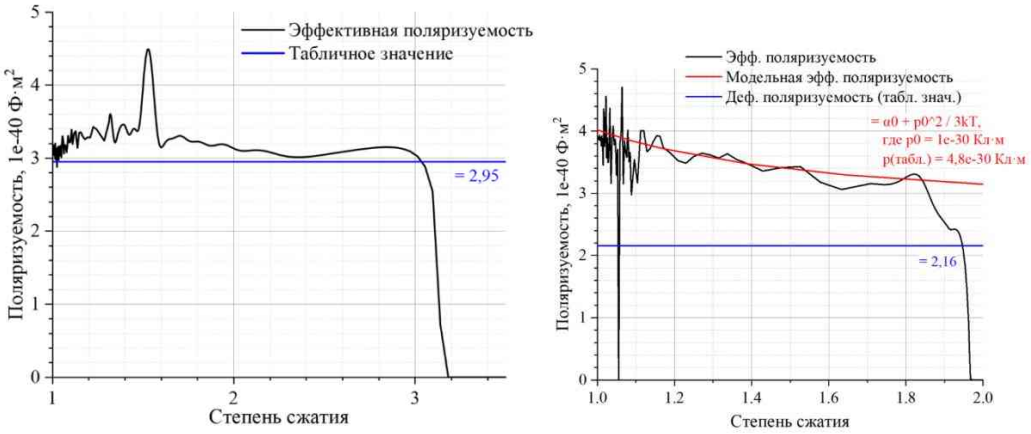


Рис. 5. Зависимости поляризуемости от степени сжатия конденсированных углекислоты (слева) и аммиака. Эффективная поляризуемость – вычисленная поляризуемость по формулам Клаузиуса-Моссотти и Дебая-Ланжевена, модельная эффективная поляризуемость – вычисленная поляризуемость, в формуле которой взято значение, в 4,8 раз превышающее табличное значение дипольного момента отдельной молекулы аммиака.

Список литературы:

1. М.И. Долотенко. Магнитокумулятивные генераторы МК-1 сверхсильных магнитных полей. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. 224 с.
2. K.D. Litasov et al. Solid carbon dioxide under multimegabar pressures: Isentropic magnetic compression and ab initio study of equations of state. Phys. Rev. Mater. 9, 123606 (2025).
3. М.Э. Борисова, С.Н. Койков. Физика диэлектриков. Учеб. пособие. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1979. 240 с.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРА НА МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМАХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Бадин В.В.
Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Саров

Лазер с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ) – это новый тип газовых лазеров с оптической накачкой и высокой квантовой эффективностью, позволяющий преобразовать мощное излучение диодного лазера в мощное излучение газового лазера с хорошим качеством луча. Преобладающее количество исследований было проведено при использовании аргона в качестве лазерной частицы [1-3], что обусловлено наибольшей доступностью аргона из всех инертных газов. К настоящему времени максимальная мощность лазерной генерации, равная 10 Вт (12,5 Вт в максимуме), была достигнута при использовании смеси Ar-He.

Ключевым каналом потерь энергии накачки в лазерном цикле ЛОНИГ, при использовании Ar или Kr в качестве излучающего газа, является переход атомов с резонансных уровней 1s4 и 1s2 в основное состояние с испусканием фотона в УФ диапазоне. Из-за интенсивных излучательных переходов с уровней –p мультиплета и безызлучательных переходов с уровня 1s5 резонансные уровни 1s4 (Ar-He и Kr-He) и 1s2 (Xe-He) оказываются в значительной мере заполненными – концентрация возбужденных на уровень 1s4 атомов оказывается порядка 10^{13} $см^{-3}$ и выше. Для подавления данного канала потерь и повышения мощности генерации предлагается ввести в систему дополнительную накачку диодным излучением, с длиной волны соответствующей переходу с резонансного уровня –s мультиплета на один из уровней –p мультиплета. Таким образом, вместо перехода в основное состояние возбуждённые атомы будут эффективно переводиться на верхний лазерный уровень, участвуя в формирование инверсии населённостей и усиливая мощность лазерного излучения.

Ввиду того, что верхний лазерный уровень 2p10 в лазерном цикле заполнен и переход 2p9 ↔ 1s4 запрещен, рационально добавление в оптическую систему излучения накачки на

длинах волн 842,5 нм для Ar и 877,7 нм для Kr, соответствующих переходу 1s4↔2p8, или излучения накачки на длинах волн 810,4 нм для Ar и 829,8 нм для Kr, соответствующих переходу 1s4↔2p7 [4]. На рисунке 1 представлена поясняющая схема электронных уровней атома аргона и криптона. Уровни расположены масштабно.

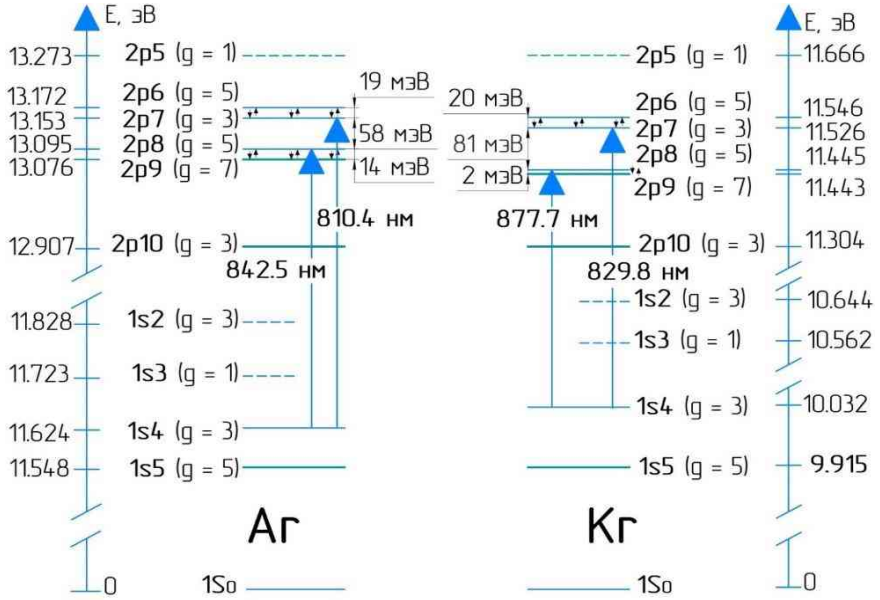


Рис. 1. Схема уровней атомов аргона и криптона с дополнительной оптической накачкой

Для проведения расчета мощности лазерной генерации при дополнительной накачке на уровень 2p7 в кинетическую модель были добавлены атомы аргона и криптона, возбужденные на уровни 2p7 и 2p6. Учет уровня 2p6 необходим из-за малой энергетической разности между уровнями 2p7 и 2p6, приводящей к интенсивному безызлучательному заполнению уровня 2p6.

Таким образом, был предложен метод увеличения мощности лазерной генерации путем введения дополнительной оптической накачки, способствующей уменьшению скорости тушения возбужденных атомов в активной среде лазера. С помощью созданной модели были выполнены предварительные расчеты, продемонстрировавшие работоспособность предложенного метода.

Список литературы

1 D. J. Emmons, D. E. Weeks, B. Eshel, and G. P. Perram, "Metastable Ar(1s5) density dependence on pressure and argon-helium mixture in a high pressure radio frequency dielectric barrier discharge," Journal of Applied Physics 123(4), 043304 (2018).

2 P. A. Mikheyev, A. K. Chernyshov, M. I. Svistun, N. I. Ufimtsev, O. S. Kartamysheva, M. C. Heaven, and V. N. Azyazov, "Transversely optically pumped Ar:He laser with a pulsed-periodic discharge," Opt Express 27, 38759-38767 (2019).

3 W. T. Rawlins, A. R. Hoskinson, K. L. Galbally-Kinney, S. J. Davis, J. A. Hopwood, J. Han, and M. C. Heaven, "Kinetics of Metastable Argon Optical Excitation and Gain in Ar/He Microplasmas," J Phys Chem A 127 (11), 2489-2502 (2023).

4 J. Gao, P. Sun, X. Wang and D. Zuo, Modeling of a dual-wavelength pumped metastable argon laser, Laser Physics Letters, 14(3), p. 035001, (2017).

ЯВНАЯ СХЕМА КАБАРЕ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ И УДАРА БАЛКИ ТИМОШЕНКО

Кузнецова Д.Д.

Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, г. Саров

Проблема численного решения задач с разрывными начальными условиями или резкими градиентами является фундаментальной в механике деформируемого твердого тела. Это видно на примере работы [1], где продемонстрировано решение простейшей одномерной

задачи продольного удара, в которой метод конечных и спектральных элементов приводит к появлению сильных нежелательных осцилляций. С течением времени отклонение численного решения от аналитического увеличивается. В то время как схема КАБАРЕ в точности описывает аналитическое решение при числе Куранта, равном 0.5 на том же числе расчётных ячеек.

Схема КАБАРЕ впервые была предложена в работах [2], [3] и распространена на гиперболические уравнения газовой динамики [4]. Она определена на минимальном вычислительном шаблоне и обладает важным свойством – возможностью коррекции потоков, что и позволяет устранять все ложные осцилляции, присущие большинству численных методов. Поэтому возникает вопрос о применении данной методики к более сложным задачам механики деформируемого твёрдого тела.

В качестве объекта исследования рассматривается балка Тимошенко, математическая модель которой представлена системой (1), объединяющей уравнения равновесия и определяющие соотношения упругости. В отличие от классической теории Эйлера–Бернулли, эта модель учитывает деформацию поперечного сдвига и инерцию поворота сечений, что делает ее незаменимой при анализе волновых и переходных динамических процессов, а также при расчетах на ударные нагрузки.

$$\begin{cases} \rho A\dfrac{\partial^2 w}{\partial t^2}+\dfrac{\partial Q}{\partial x}=0, \\ \rho J\dfrac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}-\dfrac{\partial M}{\partial x}+Q=0, \\ M=EJ\dfrac{\partial \psi}{\partial x}, \\ Q=kGA\left(\psi-\dfrac{\partial w}{\partial x}\right). \end{cases} \qquad (13)$$

где Q – поперечная сила, M – изгибающий момент, w – прогиб балки, ψ – угол поворота сечения, q – внешняя поперечная нагрузка, ρ – плотность материала, $m_0 = \rho A$, $I = \rho J$ – погонные масса и момент инерции, A, J – площадь и момент инерции поперечного сечения, E, G – модуль Юнга и модуль сдвига, k – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по сечению (для прямоугольного сечения $k = 5/6$).

Данная задача имеет множество инженерных приложений, где важна оценка работоспособности конструкции в условиях высокочастотных колебаний или учёта всего частотного спектра. Это важно при анализе аэрокосмических конструкций, мостовых и строительных сооружений.

С помощью замены (2), в которой осуществляется переход от кинематических факторов к скоростям (v – поперечная скорость, Ω – угловая скорость), систему (1) можно привести к системе гиперболических уравнений первого порядка (3).

$$v=\frac{\partial w}{\partial t},\quad \Omega=\frac{\partial \psi}{\partial t} \qquad (14)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\eta}}{\partial t}+B\frac{\partial \boldsymbol{\eta}}{\partial x}=\boldsymbol{b} \qquad (15)$$

Где $\boldsymbol{\eta}=\begin{pmatrix} v & \Omega & M & Q \end{pmatrix}^T$, $\boldsymbol{b}=\begin{pmatrix} \dfrac{q}{m_0} & -\dfrac{Q}{I} & 0 & kGA\Omega \end{pmatrix}^T$, $B=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dfrac{1}{m_0} \\ 0 & 0 & -\dfrac{1}{I} & 0 \\ 0 & -EJ & 0 & 0 \\ kGA & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Определяя собственные значения λ_k и собственные векторы $\boldsymbol{l}_k$ матрицы B следующим образом:

$$\lambda_1 = -c_s \to \boldsymbol{l}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\dfrac{1}{m_0 c_s} \end{pmatrix} \quad \lambda_3 = -c_b \to \boldsymbol{l}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dfrac{1}{Ic_b} & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_2 = c_s \to \boldsymbol{l}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dfrac{1}{m_0 c_s} \end{pmatrix} \quad \lambda_4 = c_b \to \boldsymbol{l}_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\dfrac{1}{Ic_b} & 0 \end{pmatrix}$$

Здесь $c_s = \sqrt{\dfrac{kG}{\rho}}, c_b = \sqrt{\dfrac{E}{\rho}}$ - характеристические скорости.

Можно выполнить переход к характеристической форме и записать систему относительно инвариантов Римана R_k:

$$\frac{\partial R_k}{\partial t} + \lambda_k \frac{\partial R_k}{\partial x} = G_k$$

Здесь $$R_1 = v - \frac{1}{m_o c_s} Q, \quad R_2 = v + \frac{1}{m_o c_s} Q, \quad R_3 = \Omega + \frac{1}{Ic_b} M, \quad R_4 = \Omega - \frac{1}{Ic_b} M$$

$$G_1 = q - c_s \Omega, \quad G_2 = q + c_s \Omega, \quad G_3 = G_4 = -\frac{Q}{I}$$

Для численного решения вводятся два типа переменных: консервативные – определяются в центрах расчётных ячеек, и потоковые – в узлах сетки. Схема КАБАРЕ реализуется в три фазы. На первой вычисляются значения консервативных переменных на промежуточном временном слое согласно следующим соотношениям:

$$\begin{cases} \dfrac{v_{i-1/2}^{n+1/2} - v_{i-1/2}^{n}}{\tau/2} + \dfrac{1}{m_0} \dfrac{Q_j^n - Q_{j-1}^n}{h} = \dfrac{1}{m_0} q_{j-1/2}^{n+1/2} \\ \dfrac{\Omega_{i-1/2}^{n+1/2} - \Omega_{i-1/2}^{n}}{\tau/2} + \dfrac{1}{I} \dfrac{M_j^n - M_{j-1}^n}{h} = -\dfrac{Q_{j-1/2}^{n+1/2}}{I} \\ \dfrac{M_{i-1/2}^{n+1/2} - M_{i-1/2}^{n}}{\tau/2} - EJ \dfrac{\Omega_j^n - \Omega_{j-1}^n}{h} = 0 \\ \dfrac{Q_{i-1/2}^{n+1/2} - Q_{i-1/2}^{n}}{\tau/2} + kGA \dfrac{v_j^n - v_{j-1}^n}{h} = kGA\Omega_{j-1/2}^{n+1/2} \end{cases}$$

На второй фазе с помощью экстраполяции инвариантов Римана (4) вычисляются потоковые переменные на новом временном слое, и именно на этой фазе вводится нелинейная коррекция потоков (5)-(6).

$$\begin{aligned} &\left(R_k\right)_{j-1}^{n+1} = 2\left(R_k\right)_{j-1/2}^{n+1/2} - \left(R_k\right)_j^n, k = 1,3 \\ &\left(R_k\right)_j^{n+1} = 2\left(R_k\right)_{j-1/2}^{n+1/2} - \left(R_k\right)_{j-1}^n, k = 2,4 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} &\min\left(R_k\right) = \min\left\{\left(R_k\right)_j^n; \left(R_k\right)_{j-1/2}^n; \left(R_k\right)_{j-1}^n\right\} + \tau G_k, k = 1,2,3,4 \\ &\max\left(R_k\right) = \max\left\{\left(R_k\right)_j^n; \left(R_k\right)_{j-1/2}^n; \left(R_k\right)_{j-1}^n\right\} + \tau G_k, k = 1,2,3,4 \end{aligned} \quad (17)$$

Где $$G_1 = q_{j-1/2}^{n+1/2} - c_s \Omega_{j-1/2}^{n+1/2}, \quad G_2 = q_{j-1/2}^{n+1/2} + c_s \Omega_{j-1/2}^{n+1/2}, \quad G_3 = G_4 = -\frac{Q_{j-1/2}^{n+1/2}}{I}$$

Итоговые значения инвариантов вычисляются по следующим соотношениям:

$$\left(R_k\right)_j^{n+1}=\begin{cases}\left(R_k\right)_j^{n+1}, if \quad \min\left(R_k\right)\le\left(R_k\right)_j^{n+1}\le\max\left(R_k\right)\\ \min\left(R_k\right), if \quad \min\left(R_k\right)>\left(R_k\right)_j^{n+1}\\ \max\left(R_k\right), if \quad \max\left(R_k\right)<\left(R_k\right)_j^{n+1}\end{cases},k=1,2,3,4 \tag{18}$$

По ним вычисляются потоковые переменные на новом временном слое.

На заключительной фазе (фаза 3) вычисляются консервативные переменные на новом слое:

$$\begin{cases}\dfrac{v_{i-1/2}^{n+1}-v_{i-1/2}^{n+1/2}}{\tau/2}+\dfrac{1}{m_0}\dfrac{Q_j^{n+1}-Q_{j-1}^{n+1}}{h}=\dfrac{1}{m_0}q\\ \dfrac{\Omega_{i-1/2}^{n+1}-\Omega_{i-1/2}^{n+1/2}}{\tau/2}+\dfrac{1}{I}\dfrac{M_j^{n+1}-M_{j-1}^{n+1}}{h}=-\dfrac{Q_{j-1/2}^{n+1/2}}{I}\\ \dfrac{M_{i-1/2}^{n+1}-M_{i-1/2}^{n+1/2}}{\tau/2}-EJ\dfrac{\Omega_j^{n+1}-\Omega_{j-1}^{n+1}}{h}=0\\ \dfrac{Q_{i-1/2}^{n+1}-Q_{i-1/2}^{n+1/2}}{\tau/2}+kGA\dfrac{v_j^{n+1}-v_{j-1}^{n+1}}{h}=kGA\Omega_{j-1/2}^{n+1/2}\end{cases}$$

Шаг во времени рассчитывается из условия Куранта – Фридрихса - Леви.

$$\tau=\frac{CFL\cdot h}{\max\left(c_s,c_b\right)}$$

Тестовые расчёты были выполнены в сравнении с аналитическим решением для шарнирно-опёртой балки Тимошенко. Аналитическое решение может быть представлено в виде простой формы [5]:

$$w=B_1\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)\cos\left(pt\right)$$

$$\psi=B_2\cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right)\cos\left(pt\right)$$

Постановка задачи, следующая: балка выводится из состояния равновесия по какой-либо из собственных форм, после чего отпускается, и происходят незатухающие колебания на соответствующей собственной частоте. Результаты исследования приведены в Таблице 1 и Таблице 2 для первой и пятой собственных частот: f_1 = 113.97 Гц, f_2 = 2612.82 Гц, при числе Куранта равном 0,2 и числе расчётных ячеек = 100. Можно видеть, что с ростом частоты погрешность отклонения возрастает. Если на первой частоте она примерно нулевая, то для пятой составляет 5%. Однако при увеличении числа расчётных ячеек по данной схеме уже для одиннадцатой частоты f_{11} = 10кГц можно добиться погрешности менее 1% при числе ячеек = 300.

Таким образом, данная работа демонстрирует преимущества применения схемы КАБАРЕ в задачах механики деформируемого твёрдого тела, относящихся к высокочастотной динамике. В рамках исследования также были решены задачи гармонического анализа, а также рассмотрены случаи резкого снятия статической нагрузки и ударного нагружения.

Таблица 1. Результаты для поперечной скорости и изгибающего момента

L, м	$v_{ан}$, *м/с*	$v_ч$, *м/с*	δ_v, %	$M_{ан}$, *Н·м*	$M_ч$, *Н·м*	δ_M, %
n = 1						
0.335	-4.078e+00	-4.079e+00	0.010	-6.702e+0	-6.701e+03	0.008
0.667	-4.041e+00	-4.042e+00	0.021	-6.641e+03	-6.641e+03	0.004
n = 5						
0.335	-8.848e+01	-9.336e+01	5.508	-1.480e+05	-1.421e+05	3.933
0.667	-9.247e+01	-9.784e+01	5.817	-1.546e+05	-1.490e+05	3.609

Таблица 2. Результаты для угловой скорости и поперечной силы

L, м	$\Omega_{ан}$, *рад/с*	$\Omega_{ч}$, *рад/с*	$\delta_{\Omega,}$ %	$Q_{ан}$, *Н*	$Q_{ч}$, *Н*	$\delta_{Q,}$ %
n = 1						
0.335	-7.264e+00	-7.269e+00	0.081	-1.198e+04	-1.198e+04	0.003
0.667	7.463e+00	7.467e+00	0.054	1.231e+04	1.231e+04	0.001
n = 5						
0.335	7.422e+02	7.801e+02	5.107	1.363e+06	1.329e+06	2.535
0.667	-6.449e+02	-6.787e+02	5.252	-1.185e+06	-1.164e+06	1.734

Список литературы:

1. Idesman, D. Pham, J.R. Foley, M. Schmidt. Accurate solutions of wave propagation problems under impact loading by the standard, spectral and isogeometric high-order finite elements. Comparative study of accuracy of different space-discretization techniques // Finite Element in Analysis and Design. — 2014. — № 88. — pp. 67-89;
2. В.М. Головизнин, А.А. Самарский. Разностная аппроксимация конвективного переноса с пространственным расщеплением временной производной // Матем. моделирование. — 1998, Т. 10, № 2, с. 86—100;
3. В.М. Головизнин, А.А. Самарский. Некоторые свойства разностной схемы КАБАРЕ. Математическое моделирование, 1998. 10(10): p. 101-116;
4. В.М. Головизнин, М.А. Зайцев, С.А. Карабасов, И.А. Короткин. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. – М: Издательство Московского университета, 2013, 472 с.
5. В.Л Бидерман. Теория механических колебаний, 1980, 40

РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕТОНАЦИИ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Банников Н.В., Дерюгин Ю.Н.

Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, г. Саров

Целью данной работы является построение одномерной методики на основе метода SPH [1, 2] для моделирования процесса инициирования ударной волной взрыва конденсированного взрывчатого вещества (ВВ). Данный процесс включает в себя распространение высокого давления по конденсированному ВВ, значительную деформацию вещества ВВ, процесс разложения ВВ и выделение энергии при разложении ВВ, которая поддерживает процесс разложения ВВ.

В одномерной постановке исходная система уравнений включает уравнение кинетики разложения ВВ относительно изменения концентрации взрывчатого вещества C, уравнение неразрывности, уравнение сохранения количества движения, уравнение сохранения энергии и закон Гука в дифференциальной форме. Система дифференциальных уравнений в переменных Лагранжа имеет вид:

$$\frac{dC}{dt} = -F(C, P, \rho), \#(1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \frac{\partial u}{\partial x}, \#(2)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{\rho}\left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial x}\right), \#(3)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\rho}(\tau_x - P)\frac{\partial u}{\partial x}, \#(4)$$

$$\frac{d\tau_x}{dt} = \frac{4}{3}\mu \frac{\partial u}{\partial x}. \#(5)$$

Здесь функция F задает скорость химического превращения и зависит от выбранного типа ВВ, ρ – плотность, u – скорость, p – давление, ε – внутренняя энергия, τ_x – девиатор тензора напряжения, а μ является модулем сдвига. Для описания пластических течений используется условие Мизесса [3]:

$$\tau_y = \tau_z = -\frac{1}{2}\tau_x, \qquad \tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2 \le \frac{2}{3}Y_0^2, \#(6)$$

где Y_0 – предел текучести материала. Уравнения замыкаются уравнением состояния:

$$P = P(C, \rho, \varepsilon). \#(7)$$

В методе сглаженных частиц непрерывная среда заменяется системой материальных частиц с массами m_j. Для произвольной функции $A(x)$ используется ядерная аппроксимация:

$$A(x) \approx \int A(x')W(x - x', h)\, dx', \#(8)$$

где W – сглаживающее ядро, а h - длина сглаживания [1, 2]. После перехода к частицам получаем стандартную дискретную формулу:

$$A_i \approx \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W_{ij}, \qquad W_{ij} = W\big(x_i - x_j, h\big). \#(9)$$

Плотность на частице будем вычислять из дискретного аналога уравнения неразрывности:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j \left(u_i - u_j\right)\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i}. \#(10)$$

Для уравнения движения удобно использовать симметричную консервативную форму. Введем полное напряжение $\sigma_i = -P_i + s_i$, где $s_i = \tau_{x,i}$. Тогда

$$\frac{du_i}{dt} = \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j}{\rho_j^2}\right)\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i}. \#(11)$$

Уравнение для внутренней энергии записывается в попарно – консервативной форме:

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = \frac{1}{2}\sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j}{\rho_j^2}\right)\left(u_i - u_j\right)\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i}. \#(12)$$

Для девиаторной части напряжения получаем дискретизацию:

$$\frac{ds_i}{dt} = -\frac{4}{3}\frac{\mu_i}{\rho_i}\sum_j m_j\big(u_i - u_j\big)\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i}. \#(13)$$

Для интегрирования системы SPH уравнений будем использовать метод предиктор – корректор. В этом методе на первом этапе (этапе предиктор), в отличии от стандартного двухшагового метода Рунге – Кутты, определяются предварительные значения только плотности, внутренней энергии и координат частиц:

$$\tilde{C}_k = C_k^n + \frac{\tau}{2}F_k^n, \#(14)$$

$$\tilde{\rho}_k = \rho_k^n + \frac{\tau}{2}\left(\frac{d\rho}{dt}\right)_k^n, \#(15)$$

$$\tilde{\varepsilon}_k = \varepsilon_k^n + \frac{\tau}{2}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_k^n, \#(16)$$

$$(\tilde{\tau}_x)_k = (\tau_x)_k^n + \frac{\tau}{2}\left(\frac{d\tau_x}{dt}\right)_k^n, \#(17)$$

$$\left(\tilde{\tau}_y\right)_k = \left(\tau_y\right)_k^n + \frac{\tau}{2}\left(\frac{d\tau_y}{dt}\right)_k^n, \#(18)$$

$$(\tilde{\tau}_z)_k = (\tau_z)_k^n + \frac{\tau}{2}\left(\frac{d\tau_z}{dt}\right)_k^n, \#(19)$$

$$\tilde{x}_k = x_k^n + \frac{\tau}{2}u_k^n. \#(20)$$

После этого вычисляется давление по уравнению состояния:

$$\tilde{p}_k = (1 - C)P_{\text{ВВ}}(\tilde{\rho}_k, \tilde{\varepsilon}_k) + CP_{\text{ПВ}}(\tilde{\rho}_k, \tilde{\varepsilon}_k). \#(21)$$

Этап корректор (второй этап) в рассматриваемом методе, осуществляется в два прохода. На первом проходе определяется скорость:

$$u_k^{n+1} = u_k^n + \tau\left(\frac{du(\tilde{\rho}, \tilde{p}, \tilde{\tau})}{dt}\right)_k, \#(22)$$

где плотность, давление и компоненты девиатора тензора напряжения берутся с промежуточного слоя, а искусственная вязкость с n – го слоя. Затем определяется средняя скорость частиц:

$$\bar{u}_k = \frac{u_k^n + u_k^{n+1}}{2}, \#(23)$$

и определяются плотность, внутренняя энергия, компоненты девиатора тензора напряжения и координаты частицы на новом временном слое:

$$C_k^{n+1} = C_k^n + \tau\left(\frac{dC(\tilde{\rho}, \tilde{p})}{dt}\right)_k, \#(24)$$

$$\rho_k^{n+1} = \rho_k^n + \tau\left(\frac{d\rho(\bar{u})}{dt}\right)_k, \#(25)$$

$$\varepsilon_k^{n+1} = \varepsilon_k^n + \tau\left(\frac{d\varepsilon(\bar{u}, \tilde{p}, \tilde{\tau}_x)}{dt}\right)_k, \#(26)$$

$$(\tau_x)_k^{n+1} = (\tau_x)_k^n + \tau\left(\frac{d\tau_x(\tilde{u})}{dt}\right)_k, \#(27)$$

$$\left(\tau_y\right)_k^{n+1} = \left(\tau_y\right)_k^n + \tau\left(\frac{d\tau_y(\tilde{u})}{dt}\right)_k, \#(28)$$

$$(\tau_z)_k^{n+1} = (\tau_z)_k^n + \tau\left(\frac{d\tau_z(\tilde{u})}{dt}\right)_k, \#(29)$$

$$x_k^{n+1} = x_k^n + \tau\bar{u}_k. \#(30)$$

Отметим, что производные от компонент вектора скорости, входящие в определение компонент девиатора тензора напряжений, вычисляются по средним компонентам вектора скорости. После определения компонент девиатора тензора напряжений, проверяется условие выполнения критерия текучести Мизеса:

$$\tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2 \geq \frac{2}{3} Y_0^2, \#(31)$$

где Y_0 – предел текучести материала при одноосном растяжении – сжатии.

Если это условие выполнено, то компоненты девиатора напряжений приводятся к кругу текучести с помощью нормировки:

$$(\tau_x)^{n+1} = (\tau_x)\frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \ \left(\tau_y\right)^{n+1} = \left(\tau_y\right)\frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \ (\tau_z)^{n+1} = (\tau_z)\frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \#(32)$$

где

$$\lambda = 3\frac{(\tau_x)^2 + \left(\tau_y\right)^2 + (\tau_z)^2}{Y_0^2}. \#(33)$$

В работе представлена компактная одномерная математическая модель детонации и её дискретизация методом сглаженных частиц. Записаны дискретные аналоги уравнений для плотности, скорости, энергии, напряжения и концентрации реагирующего вещества. Полученная форма удобна для построения вычислительного алгоритма и может служить основой для дальнейших численных экспериментов по определению глубины детонации, анализу параметров детонационной волны, а также определению времени задержки возникновения процесса детонации.

Список литературы:

1. Monaghan J.J. Smoothed Particle Hydrodynamics // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 1992. Vol. 30. P. 543 – 574.
2. Liu G.R., Liu M.B. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method. Singapore: World Scientific, 2003. 449 p.
3. Wilkins M.L. Calculation of Elastic – Plastic Flow // Methods in Computational Physics. 1964. Vol. 3. P. 211 – 263.
4. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 1997.

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ПЕРЕНОСА ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ФАЗ В ЗАДАЧАХ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОГО DRL-ПОДХОДА ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рожков А.А.[1,2], Козелков А.С.[1,2], Курулин В.В.[1,2]

[1]ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

[2]НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

В настоящей работе рассматривается продолжение исследования, посвящённого применению методов глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL) для автоматизированного построения численных схем переноса объемной доли фаз в рамках метода VOF (Volume-of-Fluid) [1]. В данном исследовании разработан и проанализирован гибридный метод обучения, сочетающий генетический алгоритм [2] и алгоритм DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) [3], реализованный в пакете программ ЛОГОС [4]. А также проведено систематическое исследование влияния архитектуры нейронной сети и параметров её обучения на свойства получаемой численной схемы. Рассматриваемая нейронная сеть используется в качестве схемы аппроксимации конвективного слагаемого в уравнении переноса объемной доли фаз, записанном в конечно-объёмной форме. Таким образом, задача сводится не к аппроксимации решения целиком, а к построению локальной численной схемы, определяющей значение переносимого поля на гранях контрольных объёмов. В основе математической модели лежит система уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости в сочетании с уравнением переноса объемной доли фаз. Ключевым моментом является конечно-объёмная дискретизация уравнения переноса, при которой вычисление конвективного потока требует определения значения объемной доли фазы на гранях контрольных объёмов. Именно на

этом этапе выбор аппроксимационной схемы играет определяющую роль в точности и устойчивости расчёта.

В многофазных задачах для этой цели традиционно применяются специальные сжимающие схемы переноса, такие как HRIC и M-CICSAM [5,6]. Максимальный формальный порядок точности таких схем, как правило, не превышает второго. Их ключевым достоинством является учет ориентации границы фаз относительно направления потока, что позволяет достаточно точно воспроизводить форму свободной поверхности при умеренных шагах по времени. Однако существенным ограничением классических сжимающих схем является их чувствительность к числу Куранта. Практика расчётов показывает, что при значениях числа Куранта, превышающих примерно 0.7–1.0, данные схемы начинают вести себя более диффузно и фактически деградируют к схемам первого порядка, что приводит к сильному размыванию границы фаз. Это, в свою очередь, накладывает жесткие ограничения на шаг по времени и увеличивает вычислительные затраты.

Целью данной работы является построение с использованием искусственной нейронной сети такой схемы аппроксимации конвективного слагаемого, которая сохраняла бы устойчивость и приемлемую точность при существенно больших значениях числа Куранта. Это позволило бы выполнять расчёты с большим шагом по времени и, как следствие, сократить общее время моделирования.

В качестве аппроксиматора используется нейронная сеть типа многослойного персептрона с применением нейронов смещения и нелинейных функций активации. В предыдущей работе для входа нейронной сети использовались три параметра, характеризующие локальную конфигурацию поля объемной доли фазы вблизи грани контрольного объёма.

В рамках настоящего исследования был предпринят шаг в сторону расширения входного пространства нейронной сети. Для анализа были выбраны 11 входных параметров, включающих, в частности, геометрические характеристики сетки и величины, связанные с локальным распределением объемной доли фаз, такие как проекция градиента объемной доли на направление от центра ячейки к центру грани. Целью данного этапа было выяснить, приводит ли увеличение размерности входного пространства к улучшению качества аппроксимации и устойчивости схемы.

Обучение нейронной сети осуществляется с использованием гибридного метода, сочетающего генетический алгоритм и алгоритм DDPG. На первом этапе формируется популяция нейронных сетей с различными параметрами. Для каждой особи решается набор тестовых задач переноса, по результатам которых вычисляется значение целевой функции качества. Далее осуществляется отбор наиболее успешных особей, которые используются в качестве начального приближения для последующего обучения с подкреплением. На втором этапе применяется алгоритм DDPG, модифицированный с учетом специфики рассматриваемых CFD задач: сеть «Критик» принимает на вход все весовые коэффициенты сети «Актер». В процессе обучения осуществляется корректировка параметров нейронной сети, при этом одновременно обучается критик и обновляется политика актёра. Результатом является формирование нового поколения нейронных сетей, включая эволюционные методы, после чего процесс повторяется итеративно.

Было проведено исследование параметров обучения, а также выполнено сравнение с вариантом, в котором используется исключительно генетический алгоритм без стадии обучения с по DDPG. Показано, что применение гибридного подхода позволяет достичь лучших показателей качества и стабильности по сравнению с чисто генетическим алгоритмом. Отдельное внимание в работе уделено исследованию архитектуры нейронной сети. Были рассмотрены различные варианты глубины сети, числа нейронов в скрытых слоях, а также типы функций активации, включая σ-функцию, sin и ReLU. Для случая 11 входных параметров было установлено, что усложнение архитектуры не приводит к ожидаемому улучшению качества и, напротив, может ухудшать обобщающую способность нейросетевой схемы.

В связи с этим было принято решение вернуться к конфигурации с тремя входными параметрами и повторно провести обучение и апробацию. Результаты показали, что при меньшем числе входов нейронная сеть демонстрирует более устойчивое поведение и лучшие

интегральные характеристики, поэтому именно эта конфигурация была выбрана для дальнейшего анализа и представления результатов в данной работе.

Обучение оптимальной конфигурации нейросетевой схемы выполнено на задачах движения жидкости на расчетных сетках различных типов, включая структурированные, полиэдральные и тетраэдральные сетки. Это позволило оценить универсальность предложенного подхода и его чувствительность к геометрии расчетной сетки. Далее была проведена валидация разработанной нейросетевой схемы на комплексе тестовых задач, направленных на оценку точности воспроизведения динамики свободной поверхности. Полученные результаты показывают, что нейросетевая схема корректно воспроизводит форму и эволюцию границы фаз без возникновения нефизичных осцилляций. Дополнительно выполнено сравнение с классическими схемами HRIC. Анализ показал, что при сопоставимой или более высокой точности нейросетевая схема допускает использование больших значений числа Куранта, что приводит к снижению общего времени моделирования. Особое внимание было уделено именно вычислительным затратам, так как практическая применимость метода напрямую связана с его эффективностью.

В заключительной части работы рассмотрена трехмерная задача волнового обтекания модели судна, демонстрирующая применимость предложенного подхода к практическим инженерным задачам. Результаты расчётов подтверждают способность разработанной нейросетевой схемы адекватно воспроизводить сложную динамику свободной поверхности в трехмерной постановке. Использование нейросети позволяет ускорить расчет почти на 43%. Таким образом, в работе показано, что применение гибридных методов глубокого обучения с подкреплением позволяет автоматизировать процесс построения численных схем переноса объемной доли фаз и получить устойчивую и универсальную схему, конкурентоспособную по точности с классическими подходами и обладающую преимуществами при расчётах на разнотипных сетках и при больших шагах по времени.

Результаты получены при финансовой поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодежных лабораторий № FSWE-2024-0001 (научная тема: «Разработка численных методов, моделей и алгоритмов для описания течений жидкостей и газов в естественных природных условиях, и условиях функционирования индустриальных объектов в штатных и критических условиях на суперкомпьютерах экса- и зеттапроизводительности»).

Список литературы:

1. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. // Journal of computational physics, 1981, vol. 39, pp. 201-226.
2. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Rusu A., Veness J. et al. Human-level control through deep reinforcement learning // Nature, 2015, p. 518.
3. ЛОГОС: Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.logos.vniief.ru.
4. Silver D. et al. Deterministic Policy Gradient Algorithms // ICML-14, 2014, pp. 387-395.
5. Hasse C. et al. Hybrid URANS/LES turbulence simulation of vortex shedding behind a triangular flameholder // Flow Turbulence Combust, 2009, vol.83, pp. 1-20.
6. Zhai, Z., Zhang, Z., Zhang et al. Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part-2: summary of prevent turbulence models // HVAC&R Research, 2007, vol. 13.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА

Абрамова А.А.
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, г. Саров

Введение

Уравнение Пуассона занимает центральное место в математической физике, описывая процессы электростатики, теплопроводности и диффузии. Традиционные детерминированные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (МКР), обеспечивают высокую точность, однако сталкиваются с трудностями при работе со сложной геометрией расчетных областей и в задачах высокой размерности из-за необходимости построения сетки и решения больших систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [3].

Вероятностные методы, основанные на связи эллиптических уравнений с диффузионными случайными процессами, предлагают альтернативный подход. Метод блуждания по сферам является бессеточным алгоритмом, позволяющим находить решение в произвольной точке области независимо от других точек [2]. Это свойство критически важно для задач с локализованными областями интереса. Кроме того, метод обладает естественным параллелизмом и крайне низким потреблением памяти.

Целью данной работы является численное исследование эффективности метода блуждания по сферам для решения уравнения Пуассона, разработка параллельного алгоритма и определение областей рационального применения метода в сравнении с методом конечных элементов.

Теоретические основы вероятностных методов решения эллиптических уравнений изложены в работах [1–3].

Постановка задачи

Метод блуждания по сферам относится к классу вероятностных алгоритмов решения краевых задач. Ключевая идея заключается в моделировании случайного блуждания частицы внутри области, при котором переход из текущей точки осуществляется на сферу максимального радиуса, целиком лежащую внутри области Ω. Это позволяет эффективно избегать локальных шагов и естественным образом учитывать вклад источника и граничных условий.

Метод блуждания по сфере опирается на фундаментальное свойство среднего значения для гармонических функций: для любой сферы $S(x)$ радиуса $d = \mathrm{dist}(x, \Gamma)$.целиком лежащей в Ω, справедливо

$$u(x) = \frac{1}{|S(x)|} \int_{S(x)} u(y)\ dS(y)$$

Фундаментальной основой метода служит вероятностное представление решения, установленное в работах [2, 3], где также приведено обоснование обработки граничных условий.

Рассмотрим краевую задачу для уравнения Пуассона в ограниченной области Ω с кусочно-гладкой границей Γ:

$$-\Delta u(x) = f(x),\ x \in \Omega$$

$$u(x) = \varphi(x),\ x \in \Gamma_D,\ \frac{\partial u}{\partial n}(x) = g(x),\ x \in \Gamma_N$$

где $f \in C(\overline{\Omega})$ — заданная функция источника, $\varphi(x)$ — граничные условие Дирихле, $g(x)$ — граничное условие Неймана, $\frac{\partial}{\partial n}$ — производная по внешней нормали.

Описание алгоритма

Алгоритм моделирует множество независимых случайных траекторий, начинающихся в заданной точке x_0, и усредняет накопленный вдоль них вклад.

Для каждой траектории процесс движется циклически. На каждом шаге вычисляется расстояние d от текущей точки до границы области. Если это расстояние меньше параметра остановки ε, точка попадает в пограничный слой. В этом случае находится ближайшая граничная точка b: если она принадлежит участку Дирихле, траектория завершается с добавлением значения $\varphi(b)$; если участку Неймана — частица отражается внутрь области на фиксированный шаг δ с добавлением вклада $\delta \cdot g(b)$, после чего процесс продолжается.

Если же точка находится внутри области ($d \geq \varepsilon$) , сначала учитывается вклад источника f : к накопленной сумме добавляется $\frac{d^2}{2D} f(\boldsymbol{x})$ (здесь D — размерность пространства, в нашем случае D=2). Затем выбирается случайное равномерное направление на единичной сфере, и частица перемещается на расстояние d в этом направлении, оказываясь на границе новой максимальной сферы, целиком лежащей внутри области.

После завершения всех траекторий оценка решения в точке $\boldsymbol{x}_0$ вычисляется как среднее арифметическое накопленных вкладов по всем реализациям.

Согласно [1, 2], метод обеспечивает статистическую сходимость $O\left(1/\sqrt{N}\right)$, систематическую погрешность $O(\max(\varepsilon, \delta))$ и логарифмический рост длины траектории $\mathbb{E}[\tau] \sim O(|\ln \varepsilon|)$ [2, 3].

Численное исследование

Для верификации метода был сформирован набор тестовых задач с известными аналитическими решениями. Исследование включало анализ сходимости, устойчивости к параметрам, эффективности на криволинейных границах, влияния условий Неймана и параллельного масштабирования. Все эксперименты проводились на процессоре AMD Ryzen 9 7845HX (12 физических ядер).

1. Сходимость по числу траекторий

Эксперименты подтвердили теоретическую скорость сходимости $O\left(1/\sqrt{N}\right)$ [1]. Для задачи на квадрате при $\varepsilon = 10^{-3}$ увеличение числа траекторий с 2000 до 64000 привело к уменьшению стандартного отклонения с 1.34×10^{-3} до 1.04×10^{-4}, что соответствует теоретическому множителю $\sqrt{32} \approx 5.66$. Среднее число шагов оставалось неизменным (около 7,8), что подтверждает независимость длины траектории от объема выборки.

2. Выбор параметра остановки ε

Исследование устойчивости на круге показало, что при $\varepsilon = 10^{-2}$ систематическая ошибка достигает $1{,}7 \times 10^{-2}$ из-за грубой аппроксимации криволинейной границы. Уменьшение ε до 10^{-3} снизило погрешность на порядок, а дальнейшее уменьшение до 10^{-4} не дало однозначного улучшения, но увеличило число шагов с 8 до 11. Таким образом, $\varepsilon = 10^{-3}$ выбран как оптимальный компромисс между точностью и вычислительными затратами.

3. Эффективность на криволинейных границах

Ключевое преимущество метода наиболее ярко проявилось при решении задач на областях с криволинейной границей. Для круга радиусом 0,4 с центром в $(0{,}5;\ 0{,}5)$ метод продемонстрировал уникальное свойство: в центре области траектория завершается за один шаг, обеспечивая абсолютно точное решение ($u = 1.0$, ошибка 0,00). В точках вблизи границы среднее число шагов составило 7,7-8,0, а погрешность при N=64000 достигла $2{,}8 \times 10^{-3}$. Для эллипса с полуосями 0,4 и 0,25 сложность оказалась выше: в центре потребовалось 13 шагов, у границы — до 22,5 шагов, что по-прежнему на два порядка меньше, чем у сеточных методов. Погрешность при N=10000 составила $2{,}9 \times 10^{-3}$ в центре и $1{,}3 \times 10^{-2}$ у границы.

4. Условия Неймана

Наличие отражающей границы выявило критическое условие устойчивости: необходимо соблюдать неравенство $\delta > \varepsilon$. Теоретическое обоснование данного условия приведено в работе [2], где показано, что при $\delta > \varepsilon$ метод сходится, а математическое ожидание смещенной оценки удовлетворяет оценке погрешности $O(\delta)$. Нарушение этого неравенства приводит к эффекту «зацикливания» траекторий в пограничном слое и потере состоятельности оценки.

При $\varepsilon = 10^{-3}$ и $\delta = 10^{-2}$ метод сходится: для точки вблизи границы Неймана среднее число шагов составило 107, число отражений — 14, погрешность

при N=64000 снизилась до $8{,}3 \times 10^{-3}$. Однако дисперсия оценки возросла в 19 раз по сравнению с задачей Дирихле, что требует увеличения числа траекторий в сотни раз для сохранения точности.

Нарушение условия ($\delta = \varepsilon = 10^{-3}$) привело к катастрофическому росту числа шагов (до 774), числа отражений (свыше 200 и потере точности: погрешность стабилизировалась на уровне 0,146 при точном решении 0,68 (относительная погрешность ~21%). Увеличение N до 64000 не исправило ситуацию.

5. Параллельная эффективность

Метод Монте-Карло обладает естественным параллелизмом, так как каждая траектория моделируется независимо [1, 3]. Вопросы эффективной генерации псевдослучайных чисел в параллельных вычислениях подробно рассмотрены в [1].

Для задач с достаточной вычислительной нагрузкой (более 100 шагов на траекторию) ускорение на 8 потоках достигло 6,8 раза при эффективности 85%, на 12 физических ядрах — 8,1 раза (эффективность 68%). Для легких задач (например, центр круга, один шаг) распараллеливание нецелесообразно — накладные расходы превышают полезную работу.

6. Сравнение с детерминированным методом (FEniCS)

Сравнение с эталонной реализацией МКЭ на сетке 100x100 (время 0,294 с, память 100 МБ) показало преимущество вероятностного метода. В конфигурации N=5000, 4 потока время счета составило 0,039 с при погрешности $1{,}1 \times 10^{-2}$, что в 7,5 раза быстрее. Для более высокой точности (N=10000, 12 потоков, погрешность $9{,}4 \times 10^{-4}$) время счета 0,067 с — в 4,4 раза быстрее МКЭ.

Точка безубыточности (максимальное число точек, при котором метод эффективнее глобального расчета МКЭ) составила $K \approx 7{,}5$ для оптимальной конфигурации. Потребление памяти — менее 1 МБ, что на два порядка меньше, чем у МКЭ, и является критическим преимуществом для трехмерных задач.

Полученные результаты согласуются с теоретическими оценками трудоемкости, приведенными в [2].

Заключение

Проведенное исследование подтвердило теоретические оценки [1–3]. Метод является оптимальным для задач умеренной точности (10^{-3}-10^{-2}) в областях сложной геометрии при вычислении решения в ограниченном числе точек ($K \leq 7$). Оптимальные параметры: $\varepsilon = 10^{-3}$, для условий Неймана — $\delta = 10^{-2}$.

Ключевое преимущество — эффективность на криволинейных границах: 8-22 шага (на два порядка меньше сеточных методов). Параллельное ускорение — 6-8 раз на 8-12 потоках, память — менее 1 МБ.

Основное ограничение — условия Неймана, требующие соблюдения $\delta > \varepsilon$ и увеличения выборки в сотни раз. Для чистых неймановских задач применение метода без понижения дисперсии нецелесообразно.

Список литературы:

1. Михайлов Г. А., Войтишек А. В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. — М.: Академия, 2006.
2. Михайлов Г. А., Макаров Р. Н. Решение краевых задач второго и третьего рода методами Монте–Карло// Сиб. матем. журн. — 1997. — Т. 38, № 3. — С. 603–614.
3. Елепов Б. С., Кронберг А. А., Михайлов Г. А., Сабельфельд К. К. Решение краевых задач методом Монте-Карло. — Новосибирск: Наука, 1980.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА RS-553

Федотова А.В.[2], Аниськин М.В.[2], Назаров Д.В.[1,2], Пушков В.А.[2], Скляднева Т.О.[1], Терешкина И.А.[1], Трунин И.Р.[1,2], Ткаченко М.И.[1], Симаков В.Г.[1], Гнутов И.С.[1]

[1]ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

[2]Саровский физико технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Аддитивные технологии (АТ) представляют широкий класс перспективных направлений производства деталей сложной формы посредством постепенного наращивания материала или изменения фазового состояния вещества в заданной области пространства, что существенно отличает их от традиционных методов изготовления путем удаления материала или изменения формы заготовки [1,2].

Одним из наиболее распространённых методов аддитивного производства металлических изделий является метод селективного лазерного сплавления (SLM) [3-6].

Актуальность и практическая значимость работ этого нового направления определяются широким применением материалов в авиационной, оборонной, нефтегазовой промышленностях, машиностроении, строительстве, медицине и т.д. Причем по технологии SLM возможно изготавливать изделия из различных композиций порошков с заданными термодинамическими, механическими, прочностными свойствами, которые могут быть схожи и даже превосходить по физико–механическим характеристикам материалы, полученные по стандартным технологиям.

При производстве изделий по АТ необходимо установить будет ли обладать будущая деталь требуемыми эксплуатационными характеристиками, т.е. возможна ли её эксплуатация в экстремальных условиях нагружения, например, при высоких давлениях. Для этого необходимо знать характеристики аддитивных сплавов, определенные в диапазонах скоростей деформации, характерных для работы будущего изделия.

В последнее время широко используемыми конструкционными материалами благодаря низкой плотности, удовлетворительной коррозионной стойкости, хорошей обрабатываемости, являются алюминиевые сплавы, в том числе полученные по технологии SLM.

Постановка экспериментов

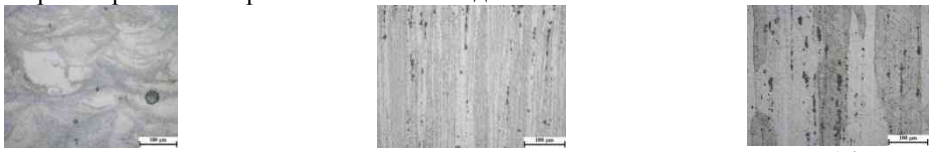
В данной работе объектом исследования выбран коррозионностойкий высокопрочный сплав системы алюминий–магний–скандий – RS–553. Приводятся результаты исследований прочностных свойств сплава RS–553, изготовленного на научно–производственной площадке ИЛМиТ (г. Москва). Свойства RS–553, определённые из экспериментов, сравниваются со свойствами алюминиевых сплавов АМг6 и Д-16Т, полученных по традиционной технологии литья.

Динамические испытания проводили с использованием метода разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [7] в диапазоне скоростей деформации $\dot{\varepsilon}$ до 10^4 $с^{-1}$ и на ударных нагружающих установках при скоростях нагружения до 400 м/с ($\dot{\varepsilon} \sim 10^5 с^{-1}$). Данные о поведении сплава RS–553 в этом диапазоне скоростей деформации отсутствуют, что сделало определение его свойств особенно актуальным.

Микроструктура, механические и статические свойства алюминиевых сплавов

Для исследования внутренней структуры и определения механических прочностных характеристик образцы исследуемых сплавов вырезали из цилиндрических заготовок, выращенных в вертикальном направлении в ИЛМиТ (сплав RS-553), и прутков в направлении проката (АМг6, Д-16Т). Размеры образцов для динамических испытаний: толщина 5 мм, диаметр 10 мм; для ударно-волновых: толщина 4 мм, диаметр 10 мм.

Микроструктуры алюминиевых сплавов RS-553, АМг6 и Д-16Т представлены на рисунке 1. На шлифе сплава RS-553 прослеживается характерная для технологии SLM чешуйчатая структура, возникающая вследствие расплава частиц материала и быстрого охлаждения. Она состоит из сплавленных между собой следов (чешуек) расплава, которые являются границами области сканирования лазером. Сплавы АМг6 и Д-16Т имеют схожую внутреннюю структуру, которая характеризуется вытянутыми зёрнами твердого раствора алюминия, на фоне которых четко видны темные, преимущественно линейно ориентированные частицы нерастворимых интерметаллических соединений.



RS-553 АМг6 Д-16Т

Рисунок 1 – Микроструктура поперечного сечения алюминиевых сплавов

Начальные физико-механические характеристики алюминиевых сплавов RS–553, Д-16Т и АМг6 приведены в таблице 1 [8-10]. Как следует из таблицы, при статических уровнях

нагружения сплав RS-553 обладает наибольшей твердостью и наибольшим значением условного предела текучести при сжатии.

Таблица 1 – Исходные характеристики сплавов

Свойства	RS–553 синтез	RS–553 отжиг	Д-16Т	АМг6
ρ_0, г/см^3	2,658	2,67	2,78	2,64
$\sigma_{0,2}$, МПа	290	435	350	170
E, ГПа	72	72	72–75	71
HV	95	150	134	65

Динамические испытания

Изучение поведения и определение динамических свойств алюминиевых сплавов в диапазоне скоростей деформации до ~10^4 с$^{-1}$ проводили с использованием метода разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) на экспериментальном комплексе СарФТИ НИЯУ МИФИ (рисунок 2). Скорость стального ударника V составляла: ≈ 9,04 м/с, ≈10,94 м/с, ≈ 14,27 м/с.

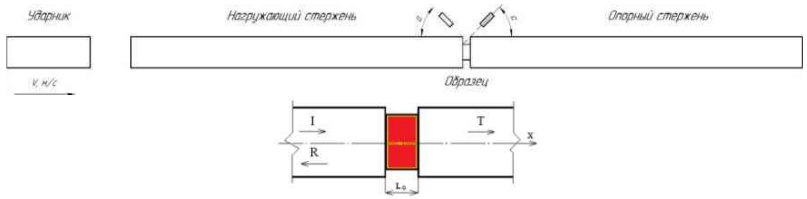
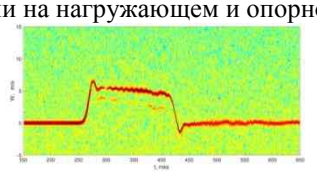
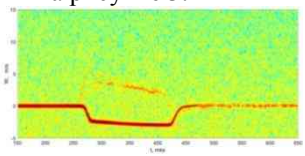


Рисунок 2 –Схема эксперимента

С помощью лазерной методики PDV на контактных поверхностях нагружающего и опорного стержней с образцом (рисунок 2) регистрировали скоростные зависимости движения поверхностей от времени. Типичные спектрограммы опытов, зарегистрированные PDV датчиками на нагружающем и опорном стержнях, приведены на рисунке 3.



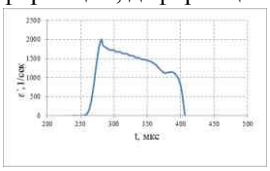
Нагружающий стержень



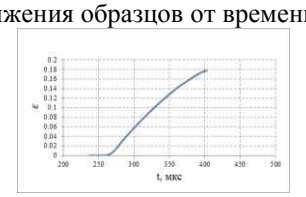
Опорный стержень

Рисунок 3 – Спектрограммы нагружающего и опорного стержней W(t)

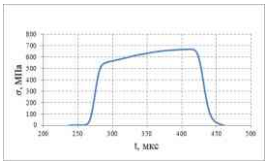
С использованием формул, предложенных Г. Кольским, строили зависимости скорости деформации, деформации и напряжения образцов от времени [11] (рисунок 4):



$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C_T}{L_0}(\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t))$$



$$\varepsilon(t) = \frac{2C_T}{L_0}\int_0^t (\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t))\,dt$$

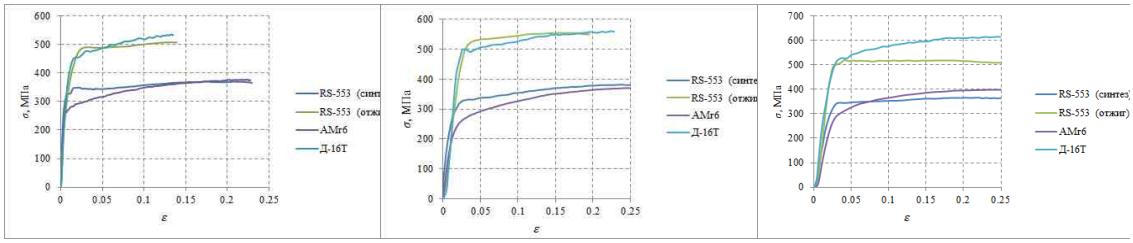


$$\sigma(t) = \frac{E_T A_T}{A_0}\varepsilon_T(t)$$

Рисунок 4 – Зависимости $\dot{\varepsilon}(t)$, $\varepsilon(t)$, $\sigma(t)$ образцов

Исключая из зависимостей $\sigma(t)$ и $\varepsilon(t)$ время как параметр, строили диаграммы деформирования исследуемых сплавов в условных координатах. Переход к истинным координатам осуществляли согласно формулам: $\dot{\varepsilon}^u(t) = \dot{\varepsilon}(t)/(1 - \varepsilon(t))$, $\varepsilon^u(t) = \ln(1 - \varepsilon(t))$, $\sigma^u(t) = \sigma(t)(1 - \varepsilon(t))$.

На рисунке 5 приведены диаграммы деформирования алюминиевых сплавов АМг6, Д-16Т и RS – 553 в истинных координатах, построенные по результатам обработки экспериментальных данных, полученных при различных скоростях соударения V.



$V \approx 9{,}04$ м/с $V \approx 10{,}94$ м/с $V \approx 14{,}27$ м/с

Рисунок 5 – Диаграммы деформирования алюминиевых сплавов при различных V

Определённые из диаграмм деформирования значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики алюминиевых сплавов

Наименование сплавов	Скорость ударника, м/с	$\dot{\varepsilon}_{max}$, c^{-1}	$\sigma_{0,2}$, МПа
RS– 553 (синтез)	9,04	1909	301
	10,94	2591	306
	14,27	3591	311
RS– 553 (отжиг)	9,04	1333	465
	10,94	1822	487
	14,27	3066	494
АМг6	9,04	2043	261
	10,94	2671	262
	14,27	3761	289
Д-16Т	9,04	1476	429
	10,94	2176	472
	14,27	3213	485

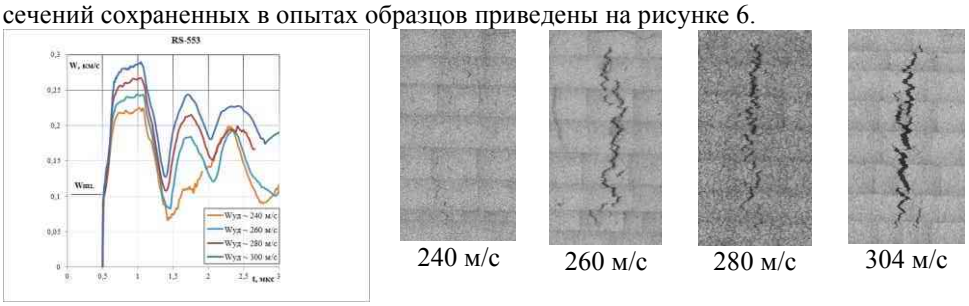
Согласно полученным результатам, условный предел текучести алюминиевого сплава RS-553, изготовленного по технологии селективного лазерного сплавления с последующим отжигом, превышает предел текучести литьевого сплава Д-16Т в диапазоне скоростей деформации от 1333 до 3761 c^{-1}. В этом же диапазоне динамического нагружения $\sigma_{0,2}$ синтезированного сплава RS-553 (без отжига) незначительно превышает предел текучести сплава АМг6 и в ~ 1,5 раза меньше, чем у сплавов Д-16Т и RS-553 с отжигом.

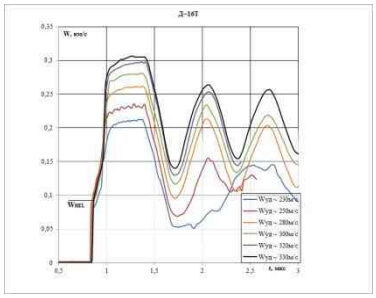
Ударно-волновые испытания

Эксперименты проводились в постановке, согласно которой плоский ударник из АМг6 толщиной 2 мм и диаметром 45 мм, разогнанный в стволе нагружающей установки пушечного типа калибром 50 мм, соударялся с образцом из исследуемого сплава.

С помощью методики PDV [12] в экспериментах регистрировалась подлетная скорость ударника к мишени $W_{уд}$, которая варьировалась от 230 до 350 м/с, и скорости движения свободных поверхностей образцов $W(t)$.

Зависимости скорости движения свободных поверхностей образцов из сплавов RS-553, Д-16Т и АМг6, полученные после обработки PDV-спектрограмм, и фотографии поперечных сечений сохраненных в опытах образцов приведены на рисунке 6.






230 м/с

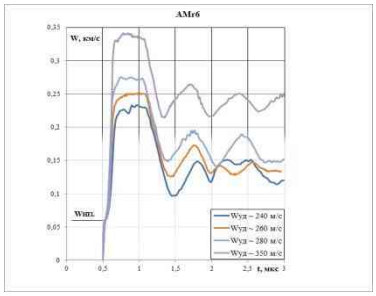

250 м/с


280 м/с


300 м/с


320 м/с


332 м/с




240 м/с


260 м/с


280 м/с

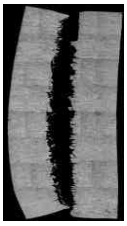

350 м/с

Рисунок 6 –Зависимости скорости движения свободных поверхностей образцов из сплавов RS-553, Д-16Т и АМг6. Металлография сохраненных после опытов образцов

Во всех опытах с разными образцами на профилях $W(t)$ зарегистрирована двухволновая конфигурация фронта ударной волны (УВ), связанная с разделением УВ на упругий предвестник и пластическую волну.

Амплитуда упругого предвестника W_{HEL} имеет наибольшее значение для сплава RS-553 и наименьшее для АМг6. Средние значения динамического предела упругости $\sigma_{HEL} = (\rho_0 C_L W_{HEL})/2$ и динамического предела текучести $Y_D = \sigma_{HEL}\frac{1-2\nu}{1-\nu}$. сравниваются в таблице 3.

Также во всех опытах регистрируется выход откольного импульса на свободную поверхность. Откольное разрушение происходит в результате взаимодействия встречных волн разрежения, которые образуются после выхода на свободные поверхности ударных волн. Возникающие в результате взаимодействия волн разрежения растягивающие напряжения могут превысить некоторую пороговую величину, после чего возникает зона с повреждениями. Чем больше значение растягивающего напряжения, тем больше повреждённость образца. Регистрация на свободной поверхности выхода ударной волны, образованной в зоне разрушения образца в виде подъёма на зависимости $W(t)$, позволяет судить о наличии поврежденности и определить величину максимального растягивающего напряжения. Значения откольной прочности $\sigma_{отк}$, определенные из экспериментальных зависимостей, которые в линейном приближении рассчитывались как: $\sigma_{\text{отк}} = \frac{1}{2}\rho_0 C_B(\Delta W + \delta)$, $\delta = (\frac{h}{C_B} - \frac{h}{C_L})\frac{|\dot{W}_1\dot{W}_2|}{|\dot{W}_1|+|\dot{W}_2|}$.[13], представлены в таблице 3.

Металлографический анализ образцов определяет характер и степень разрушения, ширину зоны разрушения, толщину откола и т.д.

Таблица 3 – Характеристики алюминиевых сплавов

Материал	σ_{HEL}, ГПа	Y_D, ГПа	$\sigma_{отк}$, ГПа
RS-553	0,88	0,50	1,21
Д-16Т	0,83	0,47	1,22
АМг6	0,49	0,28	0,84

Сопоставляя полученные значения откольной прочности и динамического предела текучести трёх испытанных материалов, можно утверждать, что аддитивный алюминиево-магниево-скандиевый сплав RS-553 обладает высокими прочностными характеристиками, не уступая АМг6 и Д-16Т, изготовленным традиционным литьевым методом. Металлографический анализ сохранённых в опытах образцов также показал высокую прочность сплава RS-553 и подтвердил многостадийный кинетический характер процесса откольного разрушения.

Список литературы:

1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. Издательство политехнического университета СПб, 2013.
2. Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Учебное пособие. СПб. Университет ИТМО. 2015.
3. Мельникова М.А., Колчанов Д.С., Мельников Д.М. Селективное лазерное плавление: применение и особенности формирования трехмерных конструктивных технологических элементов// Фотоника. 2017. Т. 62, № 2. С. 42-49.
4. Ming W., Chen J., An Q., Chen M. Dynamic mechanical properties and machinability characteristics of selective laser melted and forged Ti6Al4V. Journal of Materials Processing Tech. 2019. 271. P. 284–292.
5. Amir B., Samuha S., Sadot O. Influence of Selective Laser Melting Machine Source on the Dynamic Properties of AlSi10Mg Alloy. Materials. 2019. 12. P. 1143.
6. Brandl E., Heckenberger U., Holzinger V., Buchbinder D. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior// Materials and Design. 2012. 34. P. 159–169.
7. Gama B.A., Lopatnikov S.L., Gillespie J.W.Jr. Hopkinson bar experimental technique: A critical review. Applied Mechanics Reviews. 2004.
8. И.С. Григорьев, Е.З. Михайлов Физические величины. Справочник. Москва Энергоатомиздат, 1991. С. 53.
9. YANDEX. URL: https://ilmit.ru/upload/ilmit/documents/dat/RS-553-pyc.pdf (дата обращения: 09.10.2025).
10. YANDEX. URL: https://ruplastica.ru/sites/default/files/2022 02/Рябов%20Дмитрий_ИЛМИТ.pdf (дата обращения: 09.10.2025).
11. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. Proc. Phys. Soc. London. 1949. Sect. B 62. Sect. B 62. P. 676–700.
12. Strand O. T. et al. Compact system for highspeed velocimetry using heterodyne techniques. Rev. Sci. Instr. 2006. P. 77.
13. Канель Г.И. Искажения волновых профилей при откole в упругопластическом теле. ПМТФ. 2001. Т. 42. № 2. С. 194–198.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТИ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Коваль Р.И. [1], Диденкулов И.Н. [2], Прончатов-Рубцов Н.В. [1]

[1]ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г.Нижний Новгород

[2]ИПФ РАН, г.Нижний Новгород

Ультразвуковые технологии в наше время находят широкое применение в различных отраслях промышленности, в медицине и науке. Наиболее часто используется ультразвуковая очистка (стирка) загрязненных изделий, дезинфекция медицинских инструментов, ингаляция и увлажнение воздуха. В последние годы в задаче ультразвуковой очистки развивается новый подход, связанный с использованием озвученной струи воды, насыщенной газовыми пузырьками, которая падает на загрязненную твердую поверхность [1,2]. Очищающее действие

ультразвука, как предполагается, связано с возбуждением несферических колебаний пузырьков – ряби на их поверхности [1]. При этом пузырьки все время должны находится в акустическом поле, которое создает радиационную силу, прижимающую их к очищаемой поверхности. Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению поведения пузырьков под действием радиационной силы в акустическом резонаторе.

На маленький по сравнению с длиной волны пузырек в жидкости действует радиационная сила, обусловленная градиентом давления [3,4]:

$$F_r = -< W\,\nabla P >= Re\frac{\pi {R_0}^3}{3\gamma P_0(1-\frac{\omega^2}{{\omega_0}^2}-i\,\delta)}\nabla|P|^2, \quad (1)$$

где $W(t) = -\frac{4}{3}\pi R^3$ – мгновенный объем, а $R(t)$ – мгновенный радиус пузырька, $P(\vec{r})$ – давление в акустическом поле, угловые скобки обозначают усреднение по периоду колебаний пузырька, $\omega_0 = R_0^{-1}\sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}}$ – резонансная частота пузырька (формула Миннарта [3]), R_0 – статический радиус пузырька, δ – декремент затухания, γ – показатель политропы газа в пузырьке, P_0 – статическое давление. При $P_0 = 1$ атм для воздушных пузырьков ($\gamma = 1{,}4$):

$$\frac{\omega_0}{2\pi} \approx \frac{3{,}3}{R_0}\,[\text{кГц}], \quad (2)$$

если R_0 измеряется в мм.

В соответствии с формулой (1) радиационная сила втягивает маленькие пузырьки ($\omega < \omega_0$) в область сильного поля, а большие ($\omega > \omega_0$) выталкивает в область слабого поля. В поле стоячей волны зоны пучности и узлы давления существуют стационарно, и распределение пузырьков примерно повторяет распределение поля. Если резонатор не настроен точно на резонанс, то максимумы и минимумы интенсивности поля будут перемещаться по резонатору во времени, приводя к соответствующим движениям пузырьков. Картина становиться более сложной если резонатор не одномерный, а двух или трехмерный. В этом случае формируется сложная картина распределения интенсивности поля, заставляющая пузырьки двигаться в трех измерениях. Ниже описываются наблюдения поведения пузырьков в трехмерном акустическом резонаторе.

Экспериментальная установка состоит из акустического излучателя с резонансной частотой около 40 кГц, рабочий торец которого жестко прикреплен к днищу резонатора – кюветы размерами 10×10×4 см^3. В кювету наливается определенное количество воды. На акустический излучатель подается питающее напряжение от генератора Tektronix TDS 2002B через усилитель мощности AR75. Для контроля акустического поля в резонаторе использовался игольчатый гидрофон и осциллограф Tektronix AFG 3102. Для наблюдения пузырьков использовался микроскоп с фото и видео регистрацией. Фотография установки показана на рис. 1.



Рис. 1. Фотография установки

В ряде экспериментов толщина водного слоя в резонаторе составляла 10 мм. Она выбиралась такой, чтобы обеспечить в кювете резонанс водного слоя в пределах рабочей полосы частот излучателя. При сочетании жесткой границы на дне кюветы и свободной поверхности наверху условие резонанса можно записать в виде:

$$f_{res} = \frac{c}{2H}\left(n - \frac{1}{2}\right),\ n = 1,2,\dots,$$

где c – скорость звука в дистиллированной воде, H – толщина водного слоя.

Как видно из этого выражения, первый резонанс ($n = 1$), при котором на толщине слоя ($H = 10$ мм, $c = 1480$ м/с) укладывается четверть длины акустической волны, достигается на частоте около 37 кГц. На этой частоте в кювете формировалась стоячая волна. В другой серии экспериментов глубина слоя воды составляла 30 мм и, соответственно, резонанс столба воды достигался на той же частоте около 37 кГц для второй моды ($n = 2$).

При подаче напряжения на излучатель в воде через несколько минут начинали появляться отчетливо видимые пузырьки. Они появлялись из зародышей пузырьков, которые всегда присутствуют на стенках сосуда, в результате процесса акустической дегазации воды (выпрямленной диффузии) [4], постепенно увеличиваясь в размере. Пока пузырьки в процессе роста не достигают резонансного с акустическим полем размера ($\omega < \omega_0$), радиационная сила тянет их в пучность поля, в то время как сила Архимеда толкает их вверх. Для частоты поля 37 кГц резонансный размер пузырька составляет в соответствии с (2) $R_0 \approx 90$ мкм. При приближении радиуса пузырька к резонансному амплитуда его колебаний увеличивается, при этом, если поле достаточно сильное, колебания становятся нелинейными. Если величина радиационной силы, определяемая амплитудой поля, не превышает силу Архимеда, то пузырьки всплывают вверх, двигаясь неравномерно («рывками»). В противном случае они левитируют в толще воды в зонах вблизи пучностей поля.

Поскольку в наших экспериментах резонатор был трехмерный, то на поле стоячей волны по вертикальной координате накладывалось поле по двум горизонтальным координатам. В результате полное поле представляло собой сложную картину максимумов и минимумов, заставляя пузырьки двигаться по сложным траекториям. Тонкой подстройкой частоты генератора и амплитудой можно было менять режимы поведения пузырьков.

На рис. 2 показано образование пузырьков на нижней поверхности резонатора в результате выпрямленной диффузии. Постепенно пузырьки увеличиваются в размерах, некоторые из них сливаются, образуя, в конечном итоге, один большой пузырек. После его всплытия на этом же месте начинают появляться и расти новые пузырьки.



Рис. 2. Пузырьки на нижней поверхности резонатора.

При глубине воды в резонаторе 3 см существует одна пучность акустического поля в толще водного слоя, поэтому пузырьки могут левитировать. На рис. 3 приведен пример такой левитации, при этом показана целая гроздь пузырьков, которые довольно продолжительное время существовали, не сливаясь.



Рис. 3. Гроздь пузырьков в толще водного слоя резонатора.

Пример движения пузырьков по трехмерным траекториям приведен на рис. 4. Как указывалось выше, путем тонкой подстройки частоты при увеличении амплитуды поля можно было добиться причудливых квазирегулярных траекторий движения пузырьков в объеме резонатора. В одном из режимов пузырьки двигались в толще воды в горизонтальном направлении, формируя два тонких слоя, как показано на рис. 4. При дальнейшем увеличении амплитуды поля коллективные движения пузырьков от квазирегулярных переходили к хаотическим.



Рис. 4. Вид сбоку на два тонких слоя пузырьков в толще воды.

При наблюдении за отдельными пузырьками, либо левитирующих, либо прижатых ко дну кюветы, можно было увидеть переход от монопольных к мультипольным колебаниям. При достижении определенной пороговой амплитуды, на поверхности одиночных пузырьков внезапно возникала отчетливо видимая мелкомасштабная рябь – по поверхности пузырька начинали бегать капиллярные волны. На рис. 5 показаны два режима колебаний левитирующих пузырьков: слева пузырек сохраняет устойчивую сферическую форму при монопольных колебаниях, а справа его поверхность покрыта капиллярной рябью.



Рис. 5. Левитирующий пузырек в толще водного слоя резонатора с гладкой поверхностью (слева) и покрытый рябью (справа).

Следует отметить, что возникновении капиллярной ряби может быть обусловлено лишь потерей устойчивости монопольных колебаний, поскольку длина волны (около 37 мм) на три порядка превышает размеры видимых пузырьков (десятки мкм). Таким образом, акустическое поле возбуждает монопольные колебания пузырька, а при превышении порога параметрической неустойчивости возникают мультипольные колебания его поверхности. Появление ряби на поверхности пузырьков коррелировало с возникновением интенсивных микропотоков жидкости вокруг них.

Работа выполнена в рамках госзадания FFUF-2024-0035 ИПФ РАН.

Список литературы:

1. P.R. Birkin, D.G. Offin, T.G. Leighton An activated fluid stream – New techniques for cold water cleaning. // Ultrason. Sonochem., 2015. V. 29. P. 612-618.

2. T.J. Secker, T.G. Leighton, et. al. A cold water, ultrasonically activated stream efficiently removes proteins and prion-associated amyloid from surgicall stainless steel. // Journal of Hospital Infection, 2020. V. 106. P. 649-656.

3. A. Eller Force on a bubble in a standing acoustic wave. // J. Acoust Soc. Am., 1968. V. 43. P. 170-171.

4. L.A. Crum Bjerknes forces on bubbles in a stationary sound field. // J. Acoust. Soc. Am., 1975. V. 57. P. 1363–1370.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ С ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ В ПАРАХ РТУТИ НА КСВ

Тарасов Д. С.[1], Желтухин В. С.[1,2], Савин А. Ю.[1], Шемахин Е. Ю.[1], Киселёв Г.Б.[1]

[1]Казанский федеральный университет, г.Казань

[2]Казанский национальный исследовательский технологический университет, г.Казань

Электронная плотность является ключевым параметром плазмы, определяющим резонансные свойства плазменных антенн и эффективность люминесцентных источников света [1, 2]. Существующие методы её измерения — зонд Ленгмюра, микроволновая интерферометрия, лазерное томпсоновское рассеяние — имеют существенные ограничения: инвазивность или высокая стоимость оборудования [3]. Метод, основанный на измерении коэффициента стоячей волны (КСВ) рамочной антенны, индуктивно связанной с плазменным столбом, лишён этих недостатков: он неинвазивен и требует лишь простого антенного анализатора [4, 5]. В предыдущей работе авторов [6] метод был реализован для тлеющего разряда в парах ртути с петлевой антенной произвольной формы, однако геометрическая неопределённость петли ограничила воспроизводимость: погрешность резонансной частоты составляла ±8 МГц, погрешность плотности — около 12 %. Настоящая работа устраняет эти ограничения за счёт применения жёсткой рамочной конструкции и проведения систематического параметрического исследования девяти конфигураций устройства ввода.

Физический механизм метода основан на резонансе поверхностных электромагнитных волн на цилиндрической границе плазма–стекло. Диэлектрическая проницаемость плазмы описывается выражением:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_{\text{res}}(\omega_{\text{res}} - j\nu_c)} \tag{1}$$

где ω^2_p - плазменная частота, ω_{res}- резонансная угловая частота, ν_c - частота столкновений.

При выполнении условия $\varepsilon = -1$ на поверхности цилиндрического плазменного столба возникает резонанс поверхностных волн [7, 8]:

$$\omega_{\text{res}} = \frac{\omega_p}{\sqrt{2}} \tag{2}$$

Фактор $\sqrt{2}$ обусловлен цилиндрической симметрией задачи. Из условия (2) получается рабочая формула метода:

$$n_e = \frac{8\pi^2 \varepsilon_0 m_e f_{\text{res}}^2}{e^2} \tag{3}$$

где f_{res} — частота первого минимума КСВ, e — заряд электрона, m_e — масса электрона, ε_0 — электрическая постоянная.

Объектом исследования служила бактерицидная лампа низкого давления на парах ртути (60 Па, мощность 10 Вт, длина разряда 36 см, диаметр трубки 24 мм). Устройством ввода ВЧ-сигнала являлось медное кольцо из провода диаметром 1 мм, индуктивно связанное с плазменным столбом. Несущий каркас размером 1×1 м изготовлен из диэлектрических полипропиленовых труб диаметром 20 мм; трубка фиксируется в патронах G13 с точностью ±0,5 мм, что исключает паразитные металлические резонансы. По сравнению с гибкой петлей, применявшейся в [6], погрешность резонансной частоты снижена с ±8 МГц до ±1 МГц, погрешность определения электронной плотности — с ~12 % до ~1,5 %. Измерения КСВ проводились анализатором SARK-110 в диапазоне 0,1–200 МГц. Параметрически варьировались: диаметр кольца $d_1 \in \{1; 2; 3\}$ см и расстояние $d_2 \in \{5; 10; 15\}$ см от оси кольца до оси трубки — итого девять конфигураций.

Для верификации зарегистрирован эмиссионный спектр разряда в диапазоне 200–1100 нм (спектрометр Avantes AvaSpec-ULS2048, разрешение 0,6 нм). Электронная температура T_e определена методом графика Больцмана по пяти линиям ртути: 253,65; 365,48; 404,66; 435,83; 546,07 нм, константы из базы NIST [9].

На всех девяти кривых КСВ(f) обнаруживается характерный минимум в диапазоне 59–138 МГц, соответствующий поверхностному плазменному резонансу. Основные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Первый минимум КСВ для всех девяти конфигураций (P = 10 Вт)

№	d_1 / d_2, см	fres, МГц	КСВмин	ne, $\times 10^{14}$ м$^{-3}$
1	1 / 5	59,1	2,08	1,90
2	1 / 10	70,6	2,68	2,72
3	1 / 15	94,6	2,20	4,89
4	**2 / 5**	**103,5**	**1,077 ★**	**2,66**
5	2 / 10	100,1	1,61	2,49
6	2 / 15	97,2	1,56	2,35
7	3 / 5	75,1	1,179	0,97
8	3 / 10	69,7	1,31	4,37
9	3 / 15	68,0	1,56	4,20

★ — оптимальная конфигурация (d_1 = 2 см, d_2 = 5 см).

Оптимальной по совокупности параметров является конфигурация d_1 = 2 см, d_2 = 5 см: КСВмин = 1,077 при f_{res} = 103,5 МГц, $n_e = 2{,}66 \times 10^{14}$ м$^{-3}$. При увеличении расстояния d_2 минимум КСВ

размывается — эффективность индуктивной связи с плазмой снижается. Широкое кольцо (d_1 = 3 см) усредняет ВЧ-поле по объёму плазмы, включая периферийные области с пониженной плотностью, что ухудшает чёткость резонанса. Наблюдаемые закономерности интерпретируются через теорию слоя пространственного заряда (СПЗ): толщина СПЗ [10]

$$\delta = \frac{eE_a}{m_e\omega^2} \quad (4)$$

определяет глубину проникновения ВЧ-поля; узкое кольцо локализует поле в области СПЗ наиболее эффективно.

Электронная температура, определённая методом графика Больцмана, составила T_e = 0,915 эВ при P = 10 Вт и монотонно снижается до 0,731 эВ при P = 4 Вт. Двумерная осесимметричная гидродинамическая модель разряда в COMSOL Multiphysics (модуль Plasma, пять элементарных реакций, база LXcat/SIGLO для Hg) воспроизводит зависимости $n_e(P)$ и $T_e(P)$; расхождение по T_e с экспериментом не превышает 19 %. Расхождение КСВ-метода и COMSOL по n_e достигает двух раз, что объясняется взаимодействием узкого кольца преимущественно с тонким поверхностным слоем плазмы, тогда как модель даёт усреднённое значение по сечению трубки.

Список литературы:

1. Rayner J. P., Whichello A. P., Cheetham A. D. Physical characteristics of plasma antennas //IEEE Transactions on plasma science. – 2004. – Т. 32. – №. 1. – С. 269-281.
2. Anderson T. Plasma antennas. – Artech House, 2020.
3. Hutchinson I. H. Principles of plasma diagnostics //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2002. – Т. 44. – №. 12. – С. 2603-2603.
4. Dine S. et al. A novel technique for plasma density measurement using surface-wave transmission spectra //Plasma Sources Science and Technology. – 2005. – Т. 14. – №. 4. – С. 777-786.
5. Haas F. A., Al-Kuzee J., Braithwaite N. S. J. Electron and ion sheath effects on a microwave “hairpin” probe //Applied Physics Letters. – 2005. – Т. 87. – №. 20.
6. Киселев Г. Б., Савин А. Ю., Желтухин В. С. ПЛАЗМЕННАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ //ББК 22 Н61. – С. 70.
7. Tonks L. The high frequency behavior of a plasma //Physical Review. – 1931. – Т. 37. – №. 11. – С. 1458.
8. Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharges and materials processing. – Wiley-Interscience, 2005.
9. NIST Atomic Spectra Database. National Institute of Standards and Technology. URL: https://physics.nist.gov/asd.
10. Raizer Y. P. Gas discharge physics. Berlin: Springer-Verlag. 449 p. – 1991.

ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ AlxGa1-x/GaAs

Абрашкина М.В., Дюбуа А.Б, Сафошкин А.С., Шапошников И.А., Шапошников Н.А.

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина

Исследование гетероперехода

В работе рассмотрены механизмы многочастичных взаимодействий в сильнолегированном полупроводниковом гетеропереходе $Al_xGa_{1-x}/GaAs$, аппроксимированном треугольным потенциальным профилем, когда заполнены основная и возбужденная подзоны размерного квантования (рис. 1). Определяющую роль играют электрон-электронные взаимодействия [1-3], для анализа которых необходимо учитывать различные каналы прохождения возмущения от источников.

В работах [4-6] была предложена схема – модель взаимодействий, включая «источники» возмущений, возможные «восприемники» первичного возмущения и мыслимые сценарии электрон-электронного взаимодействия в системе 2D электронов, ведущих к формированию времени электрон-электронных взаимодействий $\tau_q^{\exp}$, измеряемого на опыте (рис. 2).

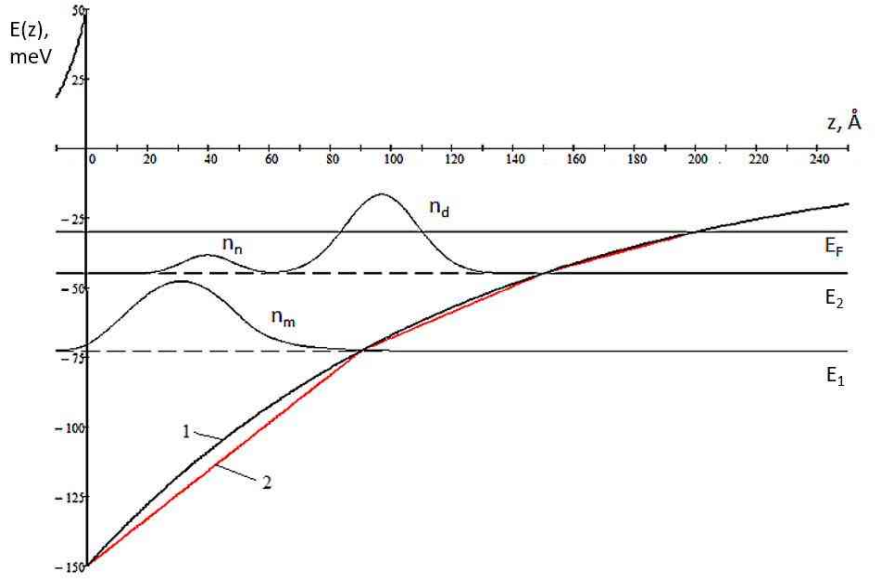


Рис. 1. Энергетическая диаграмма зоны проводимости $E_c(z)$ гетероперехода с двумя заполненными подзонами размерного квантования E_1 и E_2; n_m и $n_{n,d}$ – поверхностные концентрации 2D электронов, E_F – энергия Ферми.

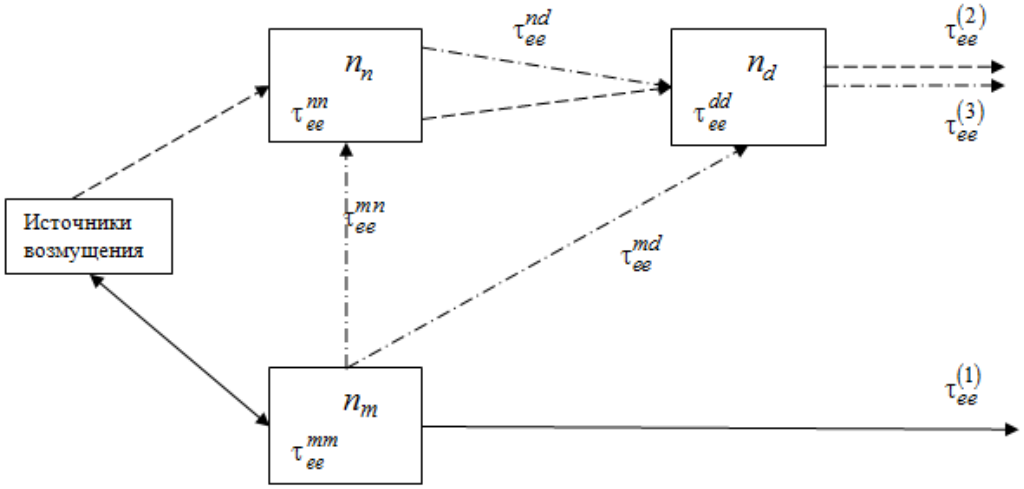


Рис. 2. Схема-модель каналов прохождения возмущения от источников.

К источникам возмущения (рис. 2) для электронов в гетеропереходе относятся изолированные доноры N_D^+, акцепторы непреднамеренного, фонового легирования N_A^-, островки роста длиной Λ и высотой Δ, колебания мольной доли δx как артефакты технологии синтеза [7-9].

Рассмотрены возможные версии (сценарии) восприятия возмущения от источников и формирование за счет электрон-электронного взаимодействия $\tau_q^{\exp}$ – фактора столкновительного уширения уровней Ландау [10-11]:

1) возмущение воспринимается 2D электронами n_m на основном уровне размерного квантования: $\tau^{(1)} \Rightarrow \left(\tau_{ee}^{mm}\right) \Rightarrow \tau_{ee}^{(1)}$.

2) возмущение воспринимает сателлит n_n на уровне E_p размерного квантования: $\tau^{(2)} \Rightarrow \left(\tau_{ee}^{nn}\right) \Rightarrow \left(\tau_{ee}^{nd}\right) \Rightarrow \left(\tau_{ee}^{mn}, \tau_{ee}^{nd}\right) \Rightarrow \left(\tau_{ee}^{mm}, \tau_{ee}^{dd}, \tau_{ee}^{md}\right) \Rightarrow \tau_{ee}^{(2)}$.

3) возмущение воспринимают 2D-электроны на уровне E_1, т.е. 2D-n_m: $\tau^{(3)} \Rightarrow \left(\tau_{ee}^{mm}\right) \Rightarrow \left(\tau_{ee}^{mn}, \tau_{ee}^{md}\right) \Rightarrow \left(\tau_{ee}^{nn}, \tau_{ee}^{dd}, \tau_{ee}^{nd}\right) \Rightarrow \tau_{ee}^{(3)}$.

Для описания эффектов электрон-электронного взаимодействия при концентрациях, достаточных для заполнения двух подзон размерного квантования, необходимо рассматривать электронный газ как слабонеоднородную квантовую плазму в гидродинамическом приближении [12-14].

Для сильнолегированного гетероперехода, аппроксимированного треугольным потенциальным профилем, когда заполнены основная и возбужденная подзоны размерного квантования, получены выражения параметрических зависимостей от температуры, которые объясняют экспериментальные зависимости [1]. Рассмотрим процесс взаимодействия частиц с импульсом $\mathbf{k}$ и $\mathbf{p}$. В результате взаимодействия получаются частицы с импульсами $\mathbf{k}+\mathbf{q}$ и $\mathbf{p}-\mathbf{q}$. Вероятность такого процесса пропорциональна интегралу столкновений

$$\sum_{\mathbf{k},\mathbf{p}} \delta\left(E_j\left(\mathbf{k}+\mathbf{q}\right)+E_l\left(\mathbf{p}-\mathbf{q}\right)-E_i\left(\mathbf{k}\right)-E_k\left(\mathbf{p}\right)\right) f_{\mathbf{k}} f_{\mathbf{p}} \left(1-f_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}\right)\left(1-f_{\mathbf{p}-\mathbf{q}}\right)$$

где f — функция распределения Ферми — Дирака. Индексы i, j, k, l обозначают следующее: электрон, находящийся в состоянии i взаимодействует с электроном в состоянии k, в результате чего происходят переходы соответственно в состояния j и l. С точностью до второго члена разложения внешнего возмущающего потенциала теории возмущений [2], выражение для времени электрон-электронного взаимодействия может быть представлено в виде

$$\frac{1}{\tau_{ij}^{ee}} = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \sum_{k,m} \sum_{\mathbf{q}} \left|V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q},\omega)\right|^2 \sum_{\mathbf{k},\mathbf{p}} \delta\left(E_j\left(\mathbf{k}+\mathbf{q}\right)+E_l\left(\mathbf{p}-\mathbf{q}\right)-E_i\left(\mathbf{k}\right)-E_k\left(\mathbf{p}\right)\right) f_{\mathbf{k}} f_{\mathbf{p}} \left(1-f_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}\right)\left(1-f_{\mathbf{p}-\mathbf{q}}\right)$$

где $V_{tot}^{ijkl}\left(\mathbf{q},\omega\right)$ — матричный элемент полного потенциала экранирования, который является Фурье-образом внешнего потенциала экранировки $V_{ext}\left(\mathbf{r}\right)$.

Решение задачи о нахождении аналитических выражений для времен релаксации сводится к нахождению элементов тензора экранирования для следующих типов взаимодействий [15]:

1. Внутриподзонное взаимодействие, ведущее к переходам внутри подзоны (матричные элементы V_{tot}^{mmmm}, V_{tot}^{pppp} времена релаксации τ_{mm}^{intra}, τ_{pp}^{intra}, индекс p может принимать значения n и d).
2. Внутриподзонное взаимодействие, ведущее к переходам между подзонами (матричные элементы V_{tot}^{mpmp}, V_{tot}^{pmpm}, времена релаксации τ_{mp}^{intra}, τ_{pm}^{intra}).
3. Межподзонное взаимодействие, ведущее к переходам внутри подзоны (матричные элементы $V_{tot}^{mmpp} = V_{tot}^{ppmm}$, времена релаксации $\tau_{mm}^{\text{inter}} = \tau_{pp}^{\text{inter}}$).
4. Межподзонное взаимодействие, ведущее к переходам между подзонами (матричные элементы $V_{tot}^{mppm} = V_{tot}^{pmmp}$, времена релаксации $\tau_{mp}^{\text{inter}} = \tau_{pm}^{\text{inter}}$).

Верхний индекс для времен релаксации обозначает характер взаимодействия (*intra* — для внутриподзонного, *inter* — для межподзонного), нижний – при $i = j$ переходы внутри подзоны, $i \neq j$ – переходы между подзонами.
Расчет времени электрон-электронных взаимодействий является одним из важных параметров при решении различных задач, в том числе, задач распространения электромагнитного излучения в планарных полупроводниковых структурах [16].

Список литературы:

1. P.T. Coleridge. Semicond. Scl. Technol. 5, 961-966 (1990).
2. D. R. Leadley, R. J. Nicholas, J. J. Harris and C. T. Foxon. Sem. Sci. Tech., 5, 1081 (1990).
3. Алферов Ж.И., Иванов С.В., Копьев П.С., Мельцер Б.Я., Полянская Т.А., Савельев И.Г., Устинов В.М., Шмарцев Ю.В. ФТП, 19, 1199 (1985).
4. А.Б. Дюбуа, В.И. Кадушкин. Вестник РГПУ, 1(9), 151-160 (2002).
5. А.Б. Дюбуа, В.И. Кадушкин. Радиоэлектроника, №5 (2002).
6. Kadushkin V.I., Dubois A.B. Phys. Low-Dim. Struct., 11/12, 27-37 (2002).
7. V.I. Kadushkin, A.B. Dubois, F.M. Tsahhaev, A.P. Melehov, Yu.N. Gorbunova. Phys. Low – Dim. Struct., 9/10, 1 – 12, (2002).
8. V.I. Kadushkin, A.B. Dubois. Phys. Low – Dim. Struct., 7/8, 7 – 24, (2003).
9. Кадушкин В.И. ФТП, 39(2). 242-246 (2005).
10. Дюбуа А.Б., Зилотова М.А., Кучерявый С.И., Сафошкин А.С. Вестник РГРТУ. 3(45). 88-92 (2013).
11. Ambartsumyan V.A., Andryushchenko E.A., Bukhenskyy K.V., Dubois A.B., Dvoretskova E.A., Gordova T.V., Kucheryavyy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 5(3). 343-353 (2014).
12. K.V. Bukhenskyy, A.B. Dubois, T.V. Gordova, S.I. Kucheryavyy, S.N. Mashnina, A.S. Safoshkin. Physics Procedia, vol. 71, pp. 359-363 (2015).
13. A.V. Baskakova, K.V. Bukhenskyy, A.B. Dubois, S.I. Kucheryavyy, S.N. Mashnina, A.S. Safoshkin. Journal of Physics: Conference Series, vol. 747, p. 012026 (2016).
14. A.A. Baukov, K.V. Bukhenskyy, A.B. Dubois, S.I. Kucheryavyy, S.N. Mashnina, A.S. Safoshkin, E.Yu. Shchigorev. Journal of Physics: Conference Series, vol. 941, p. 012059 (2017).
15. Дюбуа А.Б., Кучерявый С.И., Сафошкин А.С. Известия вузов. Физика. 64. 4(761), 163-169 (2021).
16. Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Конюхов А.Н. Кучерявый С.И., Сафошкин А.С. Ученые записки физического факультета Московского университета. 1, 2310301 (2023).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАФЕНОВЫХ СТРУКТУРАХ

Абрашкина М.В., Дюбуа А.Б, Казарян Р.Г., Сафошкин А.С., Шапошников И.А., Шапошников Н.А.

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина

Открытие графена и создание терагерцовых лазеров на графене [1] стимулировали теоретические [2] и экспериментальные [3] исследования процессов перераспределения электромагнитных волн на планарных структурах.
В работе [2] исследована дифракция электромагнитных волн для ТЕ и ТМ поляризаций для изотропных и анизотропных структур. При этом рассматривался процесс отражения падающей волны из воздуха ($\varepsilon_1 = 1$) в среду с проницаемостью $\varepsilon_2 = \left(\varepsilon_t, \varepsilon_t, \varepsilon_n\right)$ (графен).
Из классической электромагнитной теории [4] коэффициенты отражения для ТМ- и ТЕ-волн имеют вид:

$$r_{1|2}^{\mathrm{TM}} = \frac{\varepsilon_t \cos\theta - \sqrt{\varepsilon_t - \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_n}\right)\sin^2\theta}}{\varepsilon_t \cos\theta + \sqrt{\varepsilon_t - \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_n}\right)\sin^2\theta}}, \quad (1)$$

$$r_{1|2}^{\mathrm{TE}} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_t - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon_t - \sin^2\theta}}, \quad (2)$$

где θ - угол падения. Таким образом, коэффициенты пропускания для ТМ- и ТЕ-волн составляют

$$t_{1|2}^{\mathrm{TM}} = \frac{2\varepsilon_t \cos\theta}{\varepsilon_t \cos\theta + \sqrt{\varepsilon_t - \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_n}\sin^2\theta}}, \quad (3)$$

$$t_{1|2}^{\mathrm{TE}} = \frac{2\cos\theta}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon_t - \sin^2\theta}} \quad (4)$$

соответственно; в идеальном случае без потерь пропускная способность ТЕ-волн равняется $T^{\mathrm{TE}} = 1 - \left|r_{1|2}^{\mathrm{TE}}\right|^2$. Когда область 2 является изотропной средой (т.е. $\varepsilon_t = \varepsilon_n$), из анализа выражений для коэффициентов отражения следует, что для ТМ- и ТЕ-волн отражательная способность будет отлична от нулевой, за исключением случаев, когда угол падения является углом Брюстера для ТМ-волн [4].

Однако даже в самом простом приближении решение уравнений Максвелла при заданных граничных и краевых условиях приводит к громоздким интегродифференциальным уравнениям [5], которые имеют строго аналитическое решение только для определенных геометрий структур [6].

В данной работе решена задача для поверхностной волны на планарной гетероструктуре, привлекательность которой объясняется следующими факторами:

1) относительная простота используемых теоретических моделей распространения электромагнитного излучения вдоль таких структур;

2) фундаментальность получаемых результатов, позволяющая обобщить их на более сложные геометрии структур;

3) планарная геометрия в достаточной степени близка к действительности.

В работе [5] был развит модовый метод исследования задач дифракции электромагнитного излучения на диэлектрическом барьере, где границы раздела между средами описываются параллельными или перпендикулярными плоскостями. Основным достоинством этого метода является сведение интегральных дифракционных уравнений к системе алгебраических, которые дают информацию, как о поверхностных, так и объемных полях, возбуждаемых в структуре. В работе [6] этот метод был использован для расчета процессов отражения поверхностной волны от вертикального диэлектрического барьера. В данной работе этот метод использован для расчета процесса отражения гауссова пучка от вертикального диэлектрического барьера. Последний представляет собой четыре, разделенные плоскостями $x = 0$, $z = 0$ и $z = d$ области, характеризующиеся диэлектрическими проницаемостями ε_i (где i –номер среды), с возбуждением поверхностных и объемных электромагнитных полей. Перечислим основные виды излучения при дифракции. Так как среда при $x < 0$ не обладает волноведущим эффектом для поляритона, то там будет присутствовать только

объемное отраженное излучение P^R. При $x > 0$ это, прежде всего мода поверхностного поляритона P^{sp} [7] распространяющегося вдоль оси x (при нормальном падении пучка поток поверхностной волны вдоль оси z будет отсутствовать) и объемное прошедшее излучение P^T. Как отраженное, так и прошедшее объемные поля представляются по модам излучения. Поэтому исследование процесса дифракции подразумевает анализ нескольких моментов: исследование собственных мод при $x < 0$ и $x > 0$, разложение дифрагированного излучения по собственным модам и сшивание этих полей при $x = 0$ для нахождения соответствующих амплитуд. Ниже приведены результаты численных расчетов для потоков отраженного, прошедшего излучений и для потока поверхностного поляритона.

ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	P^R	P^T	P^{sp}
1	-20	1	11.7	0.45	0.45	0.1
1	-50	5	12.0	0.54	0.29	0.17
1	-100	10	12.2	0.67	0.14	0.21
1	-1000	15	12.4	0.79	0.09	0.12

Список литературы:

1. S. Chakraborty et al. // Science. 2016. V. 351. No. 6270. P. 246-248.
2. Sh. Shah et al. // Phys. Rev. Applied. 2018. V. 10. No. 3. P. 034025.
3. B.I. Afinogenov et al. // Phys. Rev. Applied. 2018. V. 9. No. 2. P. 024027.
4. J.A. Kong // EMW Publishing, Cambridge, MA, 2008.
5. Voronko A.I., Klimova L.G., Shkerdin G.N. // Solid State Comm. 1987. Vol. 61. No. 6. P. 361.
6. Дюбуа А.Б., Лысов Р.В. // Математическое моделирование. 2006. Т. 18. №3. С. 3-12.

Школьная секция

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СОРТИРОВКА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДОВ МУСОРА ПО ФОТОГРАФИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Гончарова А.С.
МБОУ Гимназия №2, г. Саров

Введение

Проблема загрязнения окружающей среды отходами приобретает глобальный характер. В 2023 году на одного жителя России приходилось 322,3 кг мусора, что на 9,7 кг больше, чем годом ранее [1]. Основная причина низкого уровня переработки - недостаточная экологическая грамотность населения и отсутствие доступных инструментов для сортировки [2].

В городе Сарове активно развиваются экологические программы: администрация проводит агитационные кампании, открываются площадки для сбора пластика [3]. Однако для устойчивого прогресса необходимы технологические решения, которые помогут жителям быстро и правильно определять тип отходов.

В связи с этим цель работы - разработать систему на основе машинного обучения и компьютерного зрения для анализа изображений мусора с последующей выдачей рекомендаций по утилизации.

Продуктом проекта стал прототип чат-бота в социальной сети «Telegram», реализующий указанный функционал.

Основная часть

1. Обзор существующих решений

Анализ аналогов показал, что мобильное приложение Recyclist [4] предоставляет карты пунктов приема и напоминания, но требует установки и регистрации, что снижает доступность. Навык «Чистая Москва» для голосового помощника «Алиса» [5] не поддерживает загрузку фотографий и ориентирован только на столичный регион.

Наиболее удобной платформой признан Telegram [6]: низкий порог входа, отсутствие необходимости установки отдельного приложения, высокая скорость внедрения. Ранее существовавший бот «Простое Дело» [7, 8] пользовался популярностью, но его работа была прекращена. Новизна предлагаемого решения заключается в добавлении функции интеллектуальной сортировки на основе нейросетевого анализа изображений.

2. Сбор и подготовка данных

Для обучения модели использовался открытый датасет Kaggle [9], содержащий изображения шести категорий. После фильтрации и объединения классов было сформировано пять категорий: стекло, металл, бумага, пластик, общие отходы. Общий объём выборки составил 2000 изображений, равномерно распределённых по классам. Дополнительно добавлены собственные фотографии для повышения репрезентативности.

3. Архитектура модели

В основе классификатора лежит сверточная нейронная сеть (CNN), реализованная на Keras. Архитектура включает последовательность сверточных слоёв с функцией активации ReLU, слои подвыборки (max pooling), полносвязные слои и выходной слой с функцией softmax.

Изображения приводятся к размеру 224×224 пикселя, нормализуются путём деления на 255. Модель возвращает вероятности принадлежности к каждому классу. Если несколько классов имеют вероятность выше 70%, программа фиксирует наличие нескольких объектов. Точность модели на валидационной выборке составила 85%, что является хорошим результатом для начального этапа.

4. Реализация чат-бота

Бот разработан на языке Python с использованием библиотеки python-telegram-bot. Взаимодействие начинается с команды /start, после которой пользователь выбирает доступные контейнеры (бумага, стекло, пластик, металл, общие отходы). При попытке завершить выбор без указания хотя бы одного контейнера бот выводит предупреждение.

Далее пользователь отправляет фотографию мусора. Бот загружает изображение через Telegram API, сохраняет его временно, передаёт в модель для предсказания. После анализа изображение модифицируется: на него наносятся метки с названием класса отходов.

Пользователю возвращается обработанное изображение и текстовые рекомендации по утилизации.

Предусмотрена кнопка «Обратная связь» для отправки сообщений разработчику и кнопка «Вернуться к выбору контейнеров» для повторной настройки.



Рисунок 1. Основные этапы алгоритма работы чат-бота для классификации отходов по фотографиям с использованием машинного обучения

5. Тестирование и выявленные проблемы

Тестирование проводилось в реальных условиях. Система корректно распознаёт типичные объекты (стеклянные бутылки, пластиковые упаковки, бумагу), однако выявлены случаи ошибочной классификации. Например, изображение кроссовка было определено как «бумага». Это связано с недостаточным объёмом обучающей выборки и схожестью текстур.

Среди ключевых проблем, требующих решения:

- развёртывание бота на сервере (например, Yandex Cloud) для круглосуточной доступности;
- обеспечение конфиденциальности данных пользователей;
- масштабирование хранилища для обработки возрастающего объёма информации;
- повышение точности модели за счёт увеличения датасета и применения аугментации данных.

6. Перспективы улучшения

Для достижения точности 95% планируется расширить базу изображений до 10 000 экземпляров, использовать методы аугментации (повороты, масштабирование, изменение яркости), внедрить кросс-валидацию для объективной оценки качества. Кроме того, возможно интегрировать систему с картами пунктов приёма отходов и добавить элементы геймификации для повышения мотивации пользователей.

Заключение

В ходе работы был создан прототип чат-бота для определения видов мусора по фотографии с применением машинного обучения. Разработана и обучена свёрточная нейронная сеть, достигнута точность 85%. Реализован пользовательский интерфейс в Telegram, позволяющий загружать изображения, получать классификацию и рекомендации по утилизации.

Проведённое тестирование подтвердило потенциал системы для автоматизации сортировки отходов. Дальнейшее развитие связано с развёртыванием бота на сервере, расширением базы данных и оптимизацией модели. Проект может быть полезен для экологического просвещения населения и повышения эффективности переработки отходов в регионе.

Список литературы:

1. Как изменилась система обращения с ТКО за пять с половиной лет реализации национального проекта «Экология» и как проходит переход России к экономике замкнутого

цикла // Заседание совета законодателей Российской Федерации при федеральном собрании Российской Федерации. - М.: Парламентская библиотека, 2024. - С. 13.
2. Антипов И.И. Исследование возможности классификации мусора при помощи компьютерного зрения // ResearchGate. - 2023.
3. В Сарове открылась новая экологическая площадка для сбора пластиковых бутылок и крышечек // Новый город Саров. URL: https://adm-sarov.ru/about/information/news/15843/ (дата обращения: 27.01.2025).
4. Recyclist // AppStore. URL: https://clck.ru/3G96Vb (дата обращения: 27.01.2025).
5. «Чистая Москва»: навык Алисы для сортировки мусора // EORA. URL: https://eora.ru/cases/navyki-dlya-golosovyh-assistentov/chistaya-moskva-v-alise (дата обращения: 27.01.2025).
6. Telegram. URL: https://web.telegram.org/ (дата обращения: 05.02.2025).
7. Чат-бот «Простое Дело». URL: https://t.me/Prostoedelo_bot (дата обращения: 05.02.2025).
8. Так и дела. - 2020. URL: https://takiedela.ru/news/2020/09/30/prostoedelo-bot/ (дата обращения: 05.02.2025).
9. Классификация мусора // Kaggle. URL: https://www.kaggle.com/code/khangnne/keras-garbage-classification-95-accur-70c390 (дата обращения: 05.02.2025).

ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Кочедыков А. А., Трофимович С. Х.
МБОУ «Школа №168 имени И.И.Лабузы», г .Нижний Новгород

Введение

Космос с древнейших времён притягивал внимание человека: звёзды и планеты становились объектами поклонения, источником мифов и легенд, предметом пристального научного изучения. Одним из ключевых вопросов, волновавших умы мыслителей и учёных, было понимание устройства ближнего космоса – Солнечной системы [1] – и закономерностей движения небесных тел.

Актуальность темы «Движение планет Солнечной системы» обусловлена несколькими факторами:

- фундаментальностью знаний о динамике планет для развития астрономии, космонавтики и смежных наук;
- практической значимостью: понимание орбитальных движений необходимо для расчёта траекторий космических аппаратов, прогнозирования астрономических явлений, изучения эволюции Солнечной системы;
- сохраняющимся общественным интересом к космосу и поиском экзопланет, что делает базовые знания о движении планет востребованными.

Цель – изучить законы движения планет в Солнечной системе и наглядно показать особенности их орбит и периодов обращения вокруг Солнца на примере 3D-модели Солнечной системы.

В ходе исследования для достижения поставленной цели мной были сформулированы следующие **задачи**:

1. Собрать информацию о строении Солнечной системы и классификации планет.
2. Изучить основные законы движения планет (законы Кеплера и роль гравитации).
3. Сравнить орбиты планет: форму, размеры и расстояния от Солнца.
4. Проанализировать периоды обращения планет и их зависимость от расстояния до Солнца.
5. Подготовить 3D-модель Солнечной системы для представления результатов исследования.

Объект исследования – Солнечная система как гравитационно связанная совокупность небесных тел.

Предмет исследования – закономерности и механизмы движения планет вокруг Солнца.

Методы исследования:

- анализ научно-популярной и учебной литературы по астрономии;

- изучение астрономических баз данных и официальных ресурсов космических агентств;
- систематизация и визуализация полученных сведений.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования её материалов:

- на уроках астрономии и физики для иллюстрации законов небесной механики;
- во внеурочной деятельности и кружках по космонавтике;
- для популяризации научных знаний о Солнечной системе среди школьников и любителей астрономии.

В ходе проекта показано, как сложенные веками наблюдения и теоретические открытия позволили сформировать современную картину движения планет - упорядоченную, предсказуемую и в то же время полную удивительных нюансов и исключений.

1. Солнечная система: Исследование орбитальной механики планет.

1.1. История изучения движения планет Солнечной системы.

Изучение движения планет Солнечной системы прошло несколько ключевых этапов, связанных с развитием астрономических моделей, накоплением наблюдений и формулировкой фундаментальных законов. История этого процесса отражает переход от мифологических представлений к научно обоснованным теориям.

Геоцентрическая система мира

Древние цивилизации объясняли движение планет через мифы и религиозные концепции. В античности сформировалась **геоцентрическая модель мира**, согласно которой Земля находилась в центре, а все небесные тела, включая Солнце и планеты, вращались вокруг неё. Эта идея была развита древнегреческими философами (Платоном, Аристотелем) и систематизирована во II веке н. э. **Клавдием Птолемеем**.

Коперниковская революция

Польский астроном **Николай Коперник** в 1543 году опубликовал труд «О вращении небесных сфер», в котором предложил **гелиоцентрическую модель**. Согласно ей, Солнце находится в центре, а планеты, включая Землю, вращаются вокруг него по круговым орбитам. Коперник объяснял видимое суточное движение небесных тел вращением Земли вокруг своей оси.

Гелиоцентрическая система устраняла многие сложности геоцентрической модели, но Коперник сохранил представление о небесных сферах и равномерном круговом движении. Его теория встретила сопротивление, в том числе со стороны церкви, которая в 1616 году объявила её противоречащей Священному Писанию.

Вклад Тихо Браге и Иоганна Кеплера

Датский астроном **Тихо Браге** [2] более 20 лет вёл тщательные наблюдения небесных тел без использования телескопа. Он доказал, что кометы находятся далеко за пределами Луны, и наблюдал сверхновую 1577 года, что противоречило аристотелевской космологии. Браге разработал **гео-гелиоцентрическую систему**, в которой Солнце и Луна вращались вокруг Земли, а планеты – вокруг Солнца.

После смерти Браге в 1601 году его данные унаследовал немецкий астроном **Иоганн Кеплер** [3]. Изучив наблюдения, он сформулировал **три закона движения планет**:

1. **Первый закон (закон эллипсов)**: орбиты планет – эллипсы, в одном из фокусов которых находится Солнце.
2. **Второй закон (закон площадей)**: радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, описывает равные площади за равные промежутки времени. Это означает, что планета движется быстрее в перигелии (ближайшей к Солнцу точке орбиты) и медленнее в афелии (наиболее удалённой точке).
3. **Третий закон**: квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит.

Законы Кеплера дали математическое описание движения планет, но не объясняли его физическую природу.

Роль Галилея Галилея

Итальянский учёный **Галилео Галилей** [4], начав в 1610 году наблюдения в телескоп, обнаружил **спутники Юпитера** и **фазы Венеры**. Эти открытия подтверждали гелиоцентрическую модель Коперника и противоречили геоцентризму. Галилей написал труд «Диалог о двух системах мира», за что был осуждён инквизицией и помещён под домашний арест.

Закон всемирного тяготения Исаака Ньютона

Исаак Ньютон [5] в 1687 году в работе «Математические начала натуральной философии» сформулировал **закон всемирного тяготения**. Он показал, что планеты удерживаются на орбитах силой гравитации, и вывел законы Кеплера как следствие своей теории.

Дальнейшее развитие

В XVIII веке с помощью телескопа был открыт **Уран** (Уильям Гершель [6], 1781 год). В XIX веке расчёты отклонений в движении Урана привели к открытию **Нептуна** (1846 год). В XX веке развитие технологий позволило изучать Солнечную систему с помощью космических аппаратов («Вояджеры», «Кассини», «Новые горизонты»), что значительно расширило знания о движении планет и других небесных тел.

Таким образом, понимание движения планет прошло путь от мифологических и философских концепций до строгих математических и физических теорий, ставших основой современной астрономии.

1.2. Планеты Солнечной системы и их орбиты.

В Солнечной системе восемь планет, движущихся вокруг Солнца по **эллиптическим орбитам** – траекториям, формируемым гравитационным притяжением Солнца. Хотя орбиты визуально близки к круговым, каждая обладает уникальным **эксцентриситетом** – показателем вытянутости эллипса.

Ключевые параметры орбит

Орбитальные характеристики определяются несколькими величинами:

- **Среднее расстояние от Солнца** – полуось эллипса, задающая масштаб орбиты.
- **Сидерический период** – время полного оборота вокруг Солнца.
- **Эксцентриситет** – число от 0 (идеальный круг) до 1 (вытянутый эллипс).
- **Наклонение к плоскости эклиптики** – угол между плоскостью орбиты планеты и плоскостью земной орбиты.

Характеристики планет

1. **Меркурий**
   - Сидерический период: 0,241 года.
   - Эксцентриситет: 0,206 (самая вытянутая орбита среди планет).
   - Наклонение: 7°.
2. **Венера**
   - Период: 0,615 года.
   - Эксцентриситет: 0,007 (почти круговая орбита).
   - Наклонение: 3,4°.
3. **Земля**
   - Период: 1,000 года.
   - Эксцентриситет: 0,017.
   - Наклонение: 0°.
4. **Марс**
   - Период: 1,881 года.
   - Эксцентриситет: 0,093.
   - Наклонение: 1,9°.
5. **Юпитер**
   - Период: 11,86 года.
   - Эксцентриситет: 0,048.
   - Наклонение: 1,3°.
6. **Сатурн**
   - Период: 29,46 года.
   - Эксцентриситет: 0,056.
   - Наклонение: 2,5°.
7. **Уран**
   - Период: 84,02 года.
   - Эксцентриситет: 0,047.
   - Наклонение: 0,8°.
8. **Нептун**
   - Период: 164,8 года.
   - Эксцентриситет: 0,009 (почти круговая орбита).

- Наклонение: 1,8°.

Важные особенности орбитального движения

- **Перигелий и афелий.** Ближайшая к Солнцу точка орбиты называется *перигелием*, самая удалённая – *афелием*. В перигелии планета движется с максимальной скоростью, в афелии – с минимальной (следствие второго закона Кеплера).
- **Плоскость эклиптики.** Большинство планет имеют малое наклонение орбиты, поэтому их пути лежат примерно в одной плоскости. Это упрощает прогнозирование взаимных положений тел.
- **Зависимость периода от расстояния.** Чем ближе планета к Солнцу, тем выше её угловая скорость и короче сидерический период. Например, Меркурий совершает оборот за 0,24 года, а Нептун – за 164,8 года.

Группировка планет

Планеты делятся на две основные группы:

1. **Планеты земной группы** (Меркурий, Венера, Земля, Марс):
   - небольшие и плотные;
   - состоят из металлов и силикатов;
   - расположены во внутренней части Солнечной системы.
2. **Планеты-гиганты** (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун):
   - значительно крупнее земных планет;
   - состоят преимущественно из газов (водорода, гелия) и льдов;
   - находятся за поясом астероидов.

Дополнительные сведения

- **Направление вращения.** Все планеты, кроме Венеры и Урана, вращаются вокруг своей оси в том же направлении, что и обращаются вокруг Солнца. Уран имеет экстремальный наклон оси (~90°), что создаёт эффект «вращения лёжа на боку».
- **Кольцевые системы.** Четыре крупнейшие планеты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) обладают кольцами из пыли и ледяных частиц.

1.3. Физические закономерности движения планет Солнечной системы.

Движение планет подчиняется фундаментальным законам небесной механики, объединяющим эмпирические наблюдения (законы Кеплера) и физическую теорию (закон всемирного тяготения Ньютона).

1) Законы Кеплера

Эти эмпирические закономерности, сформулированные в начале XVII века, описывают геометрию и кинематику орбитального движения.

- **Первый закон (закон эллипсов):** Каждая планета движется по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Солнце:

$$r_{min}+r_{max}=2a,$$

где r_{min} – расстояние в перигелии (ближайшая точка к Солнцу), r_{max} – в афелии (самая удалённая точка), a – большая полуось эллипса.

Следствие: расстояние планеты до Солнца непостоянно, а орбита не является идеальной окружностью.

- **Второй закон (закон площадей):**

Радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, за равные промежутки времени описывает равные площади:

$$\frac{dA}{dt} = const$$

Следствия:

- скорость планеты максимальна в перигелии и минимальна в афелии;
- закон отражает сохранение момента импульса в замкнутой системе.

- **Третий закон (гармонический закон):**

Квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

где T_1^2, T_2^2 – периоды обращения, a_1^3, a_2^3 – большие полуоси орбит.

Следствие: зная полуось орбиты, можно вычислить период обращения без ожидания полного оборота.

2) Закон всемирного тяготения Ньютона

В конце XVII века Исаак Ньютон дал физическое обоснование законам Кеплера, сформулировав универсальный закон гравитации:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где:

- F – сила притяжения между телами,
- G – гравитационная постоянная (6,6720·10−11 Н·м2/кг2),
- $m1$, $m2$ – массы тел,
- r – расстояние между ними.

Ключевые следствия:

- Солнце и планета движутся вокруг общего центра масс (из-за огромной массы Солнца центр масс близок к его ядру);
- гравитация обеспечивает центростремительное ускорение, удерживающее планеты на орбитах;
- законы Кеплера – приближение для системы «Солнце + одна планета»; в реальной Солнечной системе орбиты искажаются из-за *возмущений*.

3) Возмущения и реальные орбиты

Законы Кеплера строго выполняются лишь для изолированной системы из двух тел. В Солнечной системе гравитационное влияние других планет вызывает *возмущения* – отклонения от идеальных эллипсов. Одним из примеров возмущений является влияние Юпитера на орбиты астероидов.

Выводы:

Движение планет определяется:

1. **Геометрией** (законы Кеплера),
2. **Физикой** (закон тяготения Ньютона),
3. **Возмущениями** (взаимодействие с другими телами).

Совмещение этих закономерностей позволяет:

- предсказывать положения планет с высокой точностью;
- рассчитывать траектории космических аппаратов;
- изучать эволюцию Солнечной системы.

2. Создание 3D-модели Солнечной системы.

2.1. Общие положения практической части.

Я решил сделать 3D-модель Солнечной системы с помощью бесплатного и мощного инструмента – Blender, чтобы на практике применить знания о движении планет. Мне было важно не просто «нарисовать» планеты, а добиться физически корректной анимации: чтобы Меркурий действительно обращался быстрее Земли, а Нептун - медленнее. В этом разделе я расскажу, как добивался этого результата, с какими сложностями столкнулся и как их решал.

Цель практической части – пошагово описать процесс создания модели.

Почему именно Blender? Я выбрал эту программу из-за:

- бесплатного и открытого софта;
- встроенного движка рендера (Cycles/Eevee) для фотореалистичной визуализации;
- гибкой системы анимации (ключевые кадры, кривые движения, драйверы);

Среди других программ я выделил определённые недостатки: *Unity/Unreal Engine* – избыточны для статичной модели, требуют навыков программирования; *Tinkercad* – прост, но ограничен в настройке материалов и анимации; *Mathematica/Python (matplotlib)* – хороши для графиков, но не для 3D-модели.

Для моделирования я использовал версию Blender 4.5.3, а также один аддон для создания пояса астероидов (Bool Tool).

2.2. Упрощения и таблица исходных параметров Солнечной системы.

Так как я поставил себе цель сделать свою 3D-модель как можно реалистичнее, мне нужны были определённые данные, которые я представил в таблице снизу.

Но, к сожалению, точь-в-точь воссоздать размеры Солнца и всех планет невозможно: например, при радиусе Солнца в 1 м Земля была бы на расстоянии 107 м, и ее было бы практически не видно. Также, скорость вращения некоторых спутников была изменена из-за того, что они делают полный оборот вокруг своей планеты всего за несколько часов, когда в моей 3D-модели 1 секунда реального времени равна 10 дням. Ещё, я сделал Солнце в модели

оранжевым, хотя на самом деле оно белое, потому что многим будет непривычно видеть истинный цвет нашей звезды. И последнее упрощение – это круговые орбиты планет вместо эллиптических (т.к. эксцентриситет планет относительно небольшой).

Планета	Радиус орбиты (а.е.)	Период обращения (сутки)	Экваториальный радиус (км.)
Меркурий	0,387	87,97	2439,7
Венера	0,723	224,70	6051,8
Земля	1,000	365,26	6378,1
Марс	1,524	686,98	3396,2
Юпитер	5,203	4332,59	71 492
Сатурн	9,537	10 759,22	60 268
Уран	19,191	30 685,47	25 559
Нептун	30,069	60 189,00	24 764

Пояснения к параметрам:

1. **Радиус орбиты (а.е.)**
   - Среднее расстояние от Солнца (1 а.е. ≈ 149,6 млн км).
   - Для анимации в Blender уменьшен в 10-100 раз для наглядности.
2. **Период обращения**
   - Время полного оборота вокруг Солнца.
3. **Экваториальный радиус**
   - Фактический размер планеты.
   - В 3D-модели увеличен в 500-1000 раз, чтобы планеты были видны на фоне орбит.

2.3. Основные этапы работы над моделью.

1) Начальный этап

Создание 3D-модели требовало определенного инструмента. Среди всех я выбрал самый популярный и понравившийся мне – Blender. Я начал с просмотра обучающих видеороликов из Интернета, которые научили меня основам пользования данного инструмента, после чего, наконец, я приступил к работе.

2) Основной этап

Прежде всего я решил начать с создания Солнца и планет. Создав 9 сфер [7] и отрегулировав их размер, я добавил каждой из них соответствующую текстуру.

Дальше необходимо было создать орбиты, по которым двигались бы планеты вокруг Солнца, и анимировать это движение. Я создал 8 окружностей [8], и, приняв 1 клетку за 10 млн. км., расставил их вокруг Солнца на правильном расстоянии друг от друга. Далее с помощью панели инструментов для каждой из планет я установил ограничители – соответствующие им орбиты, благодаря чему я анимировал их движение. Казалось бы, почти все готово, но при тесте я выяснил, что каждая из планет движется с одинаковой скоростью. Нужно было это исправить. Я решил принять 1 секунду реального времени за 10 земных суток (дней) в Blender, но в этой программе вместо секунд используются **кадры**. Зная, что Земля делает полный оборот вокруг Солнца ≈ за 365 дней, мне нужно было сделать так, чтобы Земля в моей 3D-модели делала полный оборот за 36,5 секунд. Я запустил таймер и выяснил, что за это время проходит ≈ 876 кадров, и установил это значение во времени полного оборота Земли вокруг Солнца. Теперь осталось установить скорость другим планетам. Проще всего это было сделать, просто домножая время полного оборота Земли на то, во сколько раз оно отличается от времени полного оборота у другой планеты. То есть, например, время полного оборота Меркурия вокруг Солнца ≈ 88 земных суток, время полного оборота Земли ≈ 365 земных суток. $\frac{88}{365} \approx 0{,}24$. Значит, время полного оборота Меркурия вокруг Солнца = 876*0,24 ≈ 210 кадров. Точно таким же образом узнаем время полного оборота других планет, и устанавливаем это значение.

3) Заключительный этап

Итак, основа для моей 3D-модели готова. Осталось добавить детали, такие как спутники, пояс астероидов, пояс Койпера и кольца у планет. Начнём со спутников. В Интернете я нашёл список основных спутников у каждой планеты, а также их период обращения и экваториальный радиус, и составил таблицу:

Планета	Спутники
Земля	Луна: период обращения 27,321661 суток, экваториальный радиус 1738,14 км.

Марс	Фобос: период обращения 0,3189 суток, экваториальный радиус 13,4 км; Деймос: период обращения 1,2624 суток, экваториальный радиус 7,5 км.
Юпитер	Ио: период обращения 1,77 суток, экваториальный радиус 1815 км; Европа: период обращения 3,55 суток, экваториальный радиус 1569 км; Ганимед: период обращения 7,16 суток, экваториальный радиус 2608 км; Каллисто: период обращения 16,69 суток, экваториальный радиус 2400 км.
Сатурн	Мимас: период обращения 0,9 суток, экваториальный радиус 197 км; Энцелад: период обращения 1,37 суток, экваториальный радиус 252 км; Титан: период обращения 15,9 суток, экваториальный радиус 2575 км; Япет: период обращения 79,3 суток, экваториальный радиус 736 км.
Уран	Миранда: период обращения 1,41 суток, экваториальный радиус 236 км; Ариэль: период обращения 2,52 суток, экваториальный радиус 582 км; Титания: период обращения 8,71 суток, экваториальный радиус 788 км; Оберон: период обращения 13,46 суток, экваториальный радиус 779 км.
Нептун	Наяда: период обращения 7,1 часа, экваториальный радиус 31 км; Таласса: период обращения 7,5 часа, экваториальный радиус 30 км; Протей: период обращения 1,122 суток, экваториальный радиус 210 км; Тритон: период обращения 5,877 суток, экваториальный радиус 1353 км.

Но после этого мне стало интересно – а как, например, открыли массу Луны и расстояние от неё до Земли? В древности **расстояние** до Луны пытались определить с помощью геометрических методов. Например, Гиппарх Никейский во II веке до н. э. использовал параллакс (разницу в положении Луны на небе, наблюдаемую из двух точек на Земле) и оценил среднее расстояние примерно в 384 000 км, что близко к современному значению.

В XX веке точность измерений резко возросла благодаря радиолокации. В 1946 году в США (проект «Двойник») и в Венгрии независимо провели успешные радиолокационные измерения. На Луну направлялся мощный радиоимпульс, который отражался от её поверхности. Время задержки между отправкой и возвращением сигнала позволяло вычислить расстояние по формуле:

$$\text{расстояние} = \frac{\text{скорость света} \times \text{время задержки}}{2}$$

Самый современный метод использует уголковые отражатели, размещённые на Луне астронавтами миссий «Аполлон» и советскими «Луноходами». Лазерный импульс, направленный с Земли, отражается от этих устройств, и время его возвращения измеряется с точностью до наносекунд. Это позволяет определять расстояние с точностью до нескольких миллиметров.

Масса Луны же была определена с помощью закона всемирного тяготения после того, как стали известны:

- расстояние от Земли до Луны;
- масса Земли;
- гравитационная постоянная G.

Чтобы найти массу Луны (m_2), нужно знать силу притяжения (F), массу Земли (m_1), расстояние (r) и G. Силу притяжения можно выразить через второй закон Ньютона: $F = m_2 a$, где a – центростремительное ускорение Луны, вызванное гравитационным притяжением Земли.

Центростремительное ускорение вычисляется по формуле:

$$a = \frac{v^2}{r},$$

где v – орбитальная скорость Луны. Её можно найти через период обращения T и расстояние до Луны:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

Подставляя всё в исходную формулу, получаем:

$$m_2 = \frac{G m_1 r}{v^2} = \frac{G m_1 r T^2}{4\pi^2 r^2} = \frac{G m_1 T^2}{4\pi^2 r}$$

Пример расчёта (с округлёнными значениями):

- G=6,67×10^{-11} Н·м^2/кг^2;
- m_1 (масса Земли) ≈5,97×10^{24} кг;
- r (среднее расстояние до Луны) ≈3,844×10^8 м;
- T (период обращения Луны) ≈27,32 суток≈2,36×10^6 с.

Подставляя эти значения, получаем массу Луны примерно равной 7,34×10^{22} кг.

Похожим образом можно узнать массу любой другой планеты Солнечной системы.

Далее, вернувшись к 3D-модели, я отрегулировал размер созданных мною спутников в соответствии с тем, как они действительно отличаются в реальности. Теперь осталось сделать для всех них орбиты. Точно так же, как и с орбитами планет, создаем окружности, но в этот раз для орбит, также как и для планет, нужен ограничитель, иначе они не будут двигаться вместе с планетами. В качестве ограничителя для спутниковых орбит я выбрал соответствующие им планетные орбиты; а для того, чтобы они не обгоняли и не отставали от планеты, я установил им то же время полного оборота вокруг Солнца. Далее каждому спутнику в правильном порядке выбираем ограничитель – его орбиту, и анимируем движение. Теперь нужно каждому спутнику установить время полного оборота вокруг соответствующей ему планеты: для этого я использовал тот же способ, что и для планет. Напомню, что 1 секунда реального времени равна 10 земным суткам в 3D-модели. Время полного оборота Луны вокруг Земли ≈ 27,7 земных суток. Это значит, что в модели Луна должна сделать полный оборот вокруг Земли за 2,77 секунд. С помощью таймера я выяснил, что за это время проходит ≈ 68 кадров, и установил это значение во времени полного оборота Луны вокруг Земли. Теперь осталось установить время полного оборота другим спутникам. Проще всего это было сделать, просто домножая время полного оборота Луны на то, во сколько раз оно отличается от времени полного оборота у другого спутника. То есть, например, время полного оборота Ганимеда вокруг Юпитера ≈ 7 земных суток, время полного оборота Луны ≈ 27,7 земных суток. $\frac{7}{27,7} \approx 0,25$. Значит, время полного оборота Ганимеда вокруг Юпитера = 27,7*0,25 ≈ 7 кадров (т.к. это значение очень низкое, я решил немного его увеличить, потому что иначе Ганимед начинает крутиться с огромной скоростью, и его почти не видно). Точно таким же образом узнаем время полного оборота других спутников, и устанавливаем это значение.

Дальше я решил сделать пояс астероидов и пояс Койпера. Для этого я решил использовать два сильно сплюснутых тора [9], которые я сделал огромными и один расположил между Марсом и Юпитером, а другой после Нептуна. Благодаря эффекту прозрачности и черному цвету, который я установил обоим торам, они стали похожи соответственно на пояс астероидов и пояс Койпера.

Осталось сделать кольца. Фактически они есть у всех газовых гигантов: Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна; но у Юпитера и Нептуна они настолько хрупкие, что их трудно увидеть с помощью традиционных инструментов для наблюдения за звёздами. Это связано с тем, что кольца состоят преимущественно из пыли и тонких обломков, а льда в них практически нет. Поэтому ими я решил пренебречь. Для создания колец Сатурна и Урана я использовал тот же тор, что и для пояса астероидов и пояса Койпера, который
я очень сильно «сплюснул». Для того, чтобы кольца не стояли на месте, а были «привязаны» к своей планете, я использовал специальный режим редактирования, в котором объединил каждое кольцо и планету, предварительно отредактировав размер и добавив текстуру каждому из колец.

В конце я добавил освещение для рендеринга, сделал так, чтобы Солнце светилось и немного двигалось, а также расставил камеры. Наконец, всё готово!

Вывод:

Созданная 3D-модель [10] позволяет визуализировать структуру Солнечной системы и динамику движения планет. Несмотря на упрощения, она корректно отражает ключевые закономерности орбитальной механики и может служить образовательным инструментом. Эта работа – не просто техническая реализация, а попытка перевести язык астрономии на язык визуальной логики, чтобы законы Вселенной стали понятнее через взаимодействие с цифровой моделью.

Заключение

В ходе работы над проектом «Движение планет Солнечной системы» было проведено комплексное изучение механизмов и закономерностей перемещения небесных тел, была создана 3D-модель Солнечной системы, а также выполнены все задачи проекта. Анализ позволил проследить эволюцию человеческих представлений о строении космоса – от

геоцентрической модели античных мыслителей до современных научных концепций. Установлено, что: орбиты планет имеют эллиптическую форму ($e \neq 0$); скорость движения планеты меняется в зависимости от расстояния до Солнца (второй закон Кеплера); существует строгая математическая связь между периодами обращения и большими полуосями орбит ($\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$). Закон всемирного тяготения Ньютона не только объяснил причины движения планет, но и позволил: вычислять массы небесных тел; прогнозировать положения планет на небесной сфере; развивать теорию возмущений и изучать динамику сложных систем. Сегодня движение планет рассматривается как результат гравитационного взаимодействия в рамках общей теории относительности, что позволяет учитывать релятивистские эффекты, влияние малых тел (астероидов, комет), долгосрочную эволюцию орбит.

Значение исследования

Изучение движения планет имеет не только теоретическое, но и прикладное значение: позволяет прогнозировать астрономические явления; служит основой для расчётов траекторий космических аппаратов; помогает понимать процессы формирования и эволюции планетных систем.

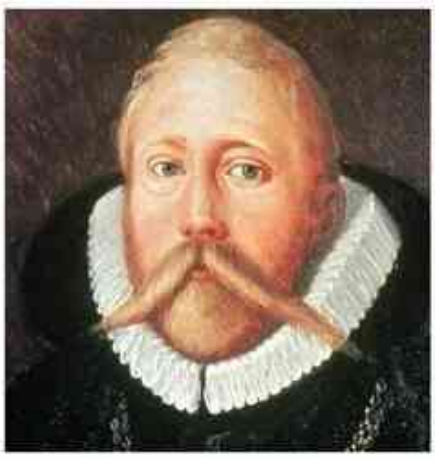
Таким образом, тема движения планет продолжает оставаться актуальной областью исследований, где пересекаются астрономия, физика и
математика. Полученные в ходе проекта знания подтверждают: понимание законов небесной механики – это ключ к освоению космоса и раскрытию тайн Вселенной.

Приложения

1.



2. Тихо Браге





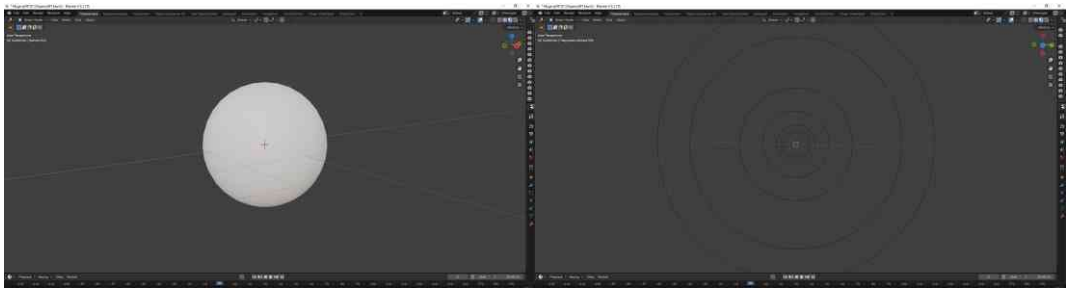
3. Иоганн Кеплер 4. Галилео Галилей



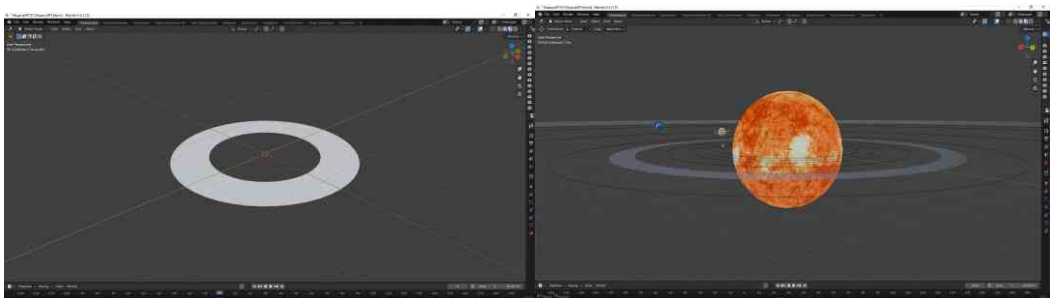

5. Исаак Ньютон 6. Уильям Гершель




7. Сфера в Blender – основа для планеты | 8. Орбиты планет в Blender



9. Тор в Blender – основа для пояса астероидов, пояса Койпера и колец планет



10. Итоговый результат – **для просмотра нужен Blender 4.5.3** – https://drive.google.com/file/d/1p3Msqbpx98xrLmVDeLIO6gc4m29btVKa/view?usp=drive_link
ВАЖНО!!! Модель из ссылки будет БЕЗ ТЕКСТУР! Это связано с тем, что в Blender текстуры – это jpg изображения, путь к которым указан через МОЮ флешку. Все текстуры хранятся на ней, обращаться за ними необходимо ко мне.

Список литературы:

1. Бронштэн В. А. Планеты и их наблюдения. – М.: Наука, 1979. – 224 с. Рассмотрены методы наблюдений и закономерности движения планет.
2. Жарков В. Н., Трубицин В. П. Физика планетных недр. – М.: Наука, 1980. – 368 с. Фундаментальное изложение физики внутренних областей планет.
3. Кеплер И. Новая астрономия / пер. с лат. – М.: Наука, 1966. – 456 с. Оригинал трёх законов орбитального движения.
4. Кондратьев К. Я. Астрономия: учебник для вузов. – М.: Академия, 2009. – 400 с. Базовый курс с разделами о законах Кеплера и ньютоновской механике.
5. Ксанфомалити Л. В. Парад планет. – М.: Физматлит, 1997. – 160 с. Анализ конфигураций планет и их видимого движения на небесной сфере.
6. Маров М. Я. Планеты Солнечной системы. – М.: Наука, 1986. – 320 с. Обзор строения и динамики планетной системы.
7. Мороз В. И. Физика планеты Марс. - М.: Наука, 1978. – 288 с. Детальное изложение физических характеристик Марса и методов их изучения.
8. Ньютон И. Математические начала натуральной философии / пер. с лат. – М.: Наука, 1989. – 688 с.
Формулировка закона всемирного тяготения и его применение к движению планет.
9. Уипл Ф. Л. Семья Солнца. – М.: Мир, 1984. – 312 с. Популярное изложение гравитационных взаимодействий и орбитальной механики.
10. Шевченко В. В. Луна и её наблюдение. – М.: Наука, 1983. – 192 с. Методы наблюдений и физические характеристики Луны в контексте системы Земля-Луна.
11. Astronomy Education at the NASA Jet Propulsion Laboratory [Электронный ресурс]. – URL: https://www.jpl.nasa.gov/edu (дата обращения: 11.01.2026). Образовательные материалы и интерактивные инструменты по небесной механике от JPL.
12. Jet Propulsion Laboratory (JPL) HORIZONS [Электронный ресурс]. – URL: https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons (дата обращения: 11.01.2026). *База эфемерид и орбитальных параметров для научных расчётов.*
13. NASA Solar System Exploration [Электронный ресурс]. – URL: https://solarsystem.nasa.gov/ (дата обращения: 11.01.2026). *Актуальные данные об орбитах, скоростях и резонансах планет, интерактивные модели.*

БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ. ФОТОСЪЕМКА С ПОМОЩЬЮ БПЛА. ОБЗОР

Цылев Н.В., Кудрявцев А.В., Трофимович С.Х.
МБОУ «Школа №168 имени И.И.Лабузы», г .Нижний Новгород

Введение

Тема проекта: Виды беспилотников и сферы их применения.

Актуальность темы: Актуальность работы обусловлена двумя основными факторами:

1. **Бурным ростом рынка БПЛА.** Количество моделей и производителей ежегодно увеличивается, расширяются технические возможности аппаратов. Ориентироваться в этом многообразии становится всё сложнее.
2. **Практической потребностью в грамотном выборе оборудования.** Современному специалисту (геодезисту, агроному, экологу, логисту) необходимо не просто знать о существовании БПЛА, а уметь осознанно выбирать тип аппарата под конкретную задачу.

Проблема: В настоящее время наблюдается противоречие между стремительным развитием технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и недостаточной осведомлённостью потенциальных пользователей (представителей бизнеса, начинающих специалистов, государственных структур) о типах дронов и их специфике.

Цель проекта: Систематизировать знания о типах БПЛА и на основе сравнительного анализа их характеристик определить оптимальные сферы применения каждого типа, а также

продемонстрировать эффективность правильного выбора на примере фотосъёмки местности с помощью БПЛА.

Поставленные задачи для достижения цели:

1. Изучить историю создания беспилотников
2. Изучить строение беспилотников
3. Изучить виды беспилотников
4. Изучить сферы деятельности беспилотников
5. Рассказать про конкретную сферу применения, которая является наиболее интересной

Этапы работы над проектом:

1. Собрать всю необходимую информацию касательно истории создания беспилотников, их строения, видах, сферах применения.
2. Из найденной информации отобрать самое важное и интересное.
3. Создать готовый материал, раскрывающий выбранную тему.

Методы и приёмы исследования и работы над проектом:

1. Анализ источников и документации.
2. Сравнительный анализ.
3. Классификация.
4. Наблюдение.
5. Визуализация данных

Раздел I. Теоретические основы истории создания БПЛА

Глава 1. История создания

1.1. История создания в мире

Первым прообразом беспилотного летательного аппарата можно считать австрийские беспилотные воздушные шары, которые использовались для бомбардировки Венеции в ходе австро-итальянской войны (1849, Австрия). Они были крайне примитивными и неуправляемыми – просто летели по ветру.

Первым беспилотником считается «Воздушная мишень», созданная в США в 1915-1916 годы для поражения немецких дирижаблей, а также тренировки пилотов. Его строение представляло из себя небольшой цельнодеревянный самолёт. Проект был не очень успешен в бою, но положил начало развитию беспилотников.

Параллельно, в 1918 году, известный американский изобретатель Питер Купер и Элмер Сперри разработали "Летающую бомбу". Летающая бомба стала первым прототипом современных крылатых ракет. Это был небольшой, дешевый биплан, сделанный из дерева и папье-маше, похожий на торпеду с крыльями. Запуск производился с катапульты.

В 1935 году в Великобритании был сконструирован беспилотник “Queen Bee” (Королева пчёл). Он мог взлетать с корабля или с суши, управлялся по радио с другого самолета или корабля, и после учебных стрельб мог совершать посадку на воду.

Успех "Королевы пчел" был огромным. Именно от названия "Bee" (пчела) пошло современное слово **"дрон" (drone)**, что означает "трутень". Это был первый массовый и эффективный беспилотник, который широко использовался для тренировок ПВО Королевского флота и ВВС.

В конце 1940-х годов началась разработка беспилотника «Ryan Firebee». Это был беспилотный реактивный самолет-мишень. Его модификации стали первыми специализированными высотными разведывательными БПЛА. Они запускались с самолетов-носителей, летали по заданному маршруту, фотографировали и затем возвращались, спускаясь на парашюте, где их подбирали вертолеты.

Ryan Firebee очень успешно использовался во время Войны во Вьетнаме.

Израильские воздушные силы, столкнувшись с мощной системой ПВО арабских стран во время войны Судного дня (1973), осознали необходимость в дешевых разведывательных беспилотниках.

Это были небольшие, простые в производстве аппараты с поршневым двигателем. Они взлетали с короткой взлетной полосы или катапульты и садились с помощью сетки. Их главной задачей была разведка в реальном времени с передачей видеоизображения на землю.

Широкое внедрение GPS навигации совершило революцию. БПЛА стали точными, способными самостоятельно следовать по сложным маршрутам.

Разработанный компанией General Atomics (США) в 1990-х, "Хищник" задал высокую планку для своих конкурентов. Изначально чисто разведывательный, он был модифицирован

для несения ракет, превратившись в первый ударный БПЛА. Это изменило характер ведения войн.

Технологии миниатюризации (уменьшения габаритов), особенно в области электроники (камеры, сенсоры, процессоры), привели к взрывному росту рынка коммерческих и любительских дронов. Появление компаний, прежде всего DJI из Китая, сделало беспилотники доступными для миллионов людей.

Технология меняется стремительно и, как считает автор всё очень скоро может измениться, даже пока я пишу этот текст.

1.2. История создания в России

История создания БПЛА в России берёт своё начало в 1940-х годах в разгар Второй мировой войны.

1. Начало создания. Проект «Беспилотный бомбардировщик»: Во время Великой Отечественной войны, в 1942 году, для поражения особо защищённых целей немецких войск был разработан проект «Беспилотного бомбардировщика».

Этот проект представлял собой устаревший бомбардировщик Ту-2 или Пе-2, который грузился взрывчаткой (до 5 тонн тротила), взлетал с пилотом, пилот наводил его на цель, после чего прыгал с парашютом. Дальнейший полёт к цели осуществлялся по радиоуправлению с сопровождающего самолёта.

Проект был реализован и успешно испытан, но в массовое производство не пошёл из-за высокой стоимости и рисков. Это была одна из первых в мире практических попыток создания ударного БПЛА.

2. Послевоенный период (1950-е – 1960-е). С появлением зенитных ракетных комплексов (ЗРК) в 1950-х годах возникла острая потребность в реалистичных воздушных мишенях для тренировок расчётов.

Стали массово создаваться БПЛА-мишени путём переоборудования списанных реактивных истребителей. Самолёт-мишень **Ла-17** и его модификации стали одними из самых массовых и долгоживущих (эксплуатировались десятилетиями).

Первые специализированные разведывательные БПЛА: Параллельно началась работа над стратегическими разведывательными аппаратами. Раньше это были целиком и полностью переделанные версии самолётов. Первым представителем стал комплекс **«Ту-123 "Ястреб"».** Разработка велась с 1960 по 1964. Это был огромный сверхзвуковой (до 2700 км/ч) беспилотный самолёт-разведчик длиной 27 метров. Стартовал с подвижной пусковой установки при помощи ускорителей, выполнял полёт на дальность до 3200 км по заданному маршруту на высоте 19-22 км, после чего производил посадку на парашюте.

«Ястреб» стал первым в СССР полноценным оперативно-тактическим беспилотным комплексом дальней разведки. Он нёс фото- и радио- разведывательную аппаратуру и предназначался для проникновения в глубокий тыл потенциального противника в Европе и Азии.

3. **Расцвет создания беспилотников (с 1960-е по 1980-е).** В этот период были созданы десятки различных систем для тактической разведки, а также ударные БПЛА.

Ту-143 - самый массовый и известный тактический разведывательный БПЛА СССР. Небольшой дозвуковой аппарат (длина 8 м), запускаемый с мобильной установки. Дальность — 180 км. Мог выполнять фото- и телевизионную разведку с последующей доставкой информации (кассеты с плёнкой) или передачей данных в реальном времени. Участвовал в боевых действиях в Ливане и в конфликте в Донбассе (в 2014 году).

Также создавались и ударные БПЛА, но их разработка и разработка разведывательных БПЛА велась в строжайшей секретности в условиях Холодной войны.

4. Упадок: К 1980-м годам СССР обладал одним из самых широких в мире парков БПЛА различного назначения — от тактических разведчиков до стратегических сверхзвуковых аппаратов. Однако, в эпоху Перестройки финансирование развития БПЛА было прервано вплоть до второй середины 1990-х годов прошлого века.

Раздел II. Применения и строение БПЛА

Глава 2. Виды беспилотников

Беспилотные летательные аппараты бывают четырёх видов: роторного, самолётного, смешанного и аэростатного.

2.1. Беспилотники роторного типа

Роторные беспилотники, чаще известные как **мультикоптеры** (квадрокоптеры, гексакоптеры, октокоптеры) — это самый популярный и узнаваемый тип дронов сегодня. В

отличие от своих "самолетных" собратьев с фиксированным крылом, они используют несколько несущих винтов (роторов) для создания подъемной силы и управления.

1. Принцип работы

Основной принцип прост: **вертикальный взлет и посадка,** и зависание в воздухе.

А) Конструкция: Основные элементы — это рама, несколько двигателей с пропеллерами (винтами), система управления (полетный контроллер), аккумулятор и полезная нагрузка (камера, датчики и т.д.).

Б) Принцип полета:

Взлет/Посадка: Все винты вращаются с одинаковой скоростью, создавая подъемную силу, направленную вверх или вниз.

Зависание: Сила тяги винтов в точности равна весу аппарата.

Наклон и движение: Чтобы полететь вперед, беспилотник увеличивает скорость вращения задних моторов и уменьшает передних. Это заставляет его наклониться, и часть тяги винтов направляется горизонтально, создавая движение.

Повороты (рыскание): Чтобы повернуться вокруг своей оси, одни винты (например, по часовой стрелке) увеличивают скорость, а другие (против часовой) — уменьшают. Возникает крутящий момент, который и разворачивает аппарат.

Классификация чаще всего идет по количеству роторов:

- **Квадрокоптер (4 ротора)** — самый распространенный вариант для хобби и профессиональной съемки.
- **Гексакоптер (6 роторов)** и **Октокоптер (8 роторов)** — более устойчивые и надежные модели, способные переносить более тяжелую нагрузку и продолжать полет при отказе одного двигателя.

2. Ключевые преимущества

Именно эти преимущества сделали мультикоптеры такими популярными:

I. **Вертолетный взлет и посадка:** Не нужна взлетно-посадочная полоса. Взлететь можно практически откуда угодно.

II. **Стабильное зависание:** Это их главное преимущество! Возможность "висеть" в одной точке незаменима для:
   a) Аэрофото- и видеосъемки.
   b) Осмотра объектов (мостов, фасадов зданий, ЛЭП).
   c) Точечного применения (например, в сельском хозяйстве).

III. **Высокая маневренность:** Способны летать в любом направлении, разворачиваться на месте и выполнять сложные движения в ограниченном пространстве.

IV. **Простота конструкции и управления:** по сравнению с настоящим вертолетом, система управления мультикоптером благодаря полетному контролеру гораздо проще и в значительной степени автоматизированна.

V. **Относительно низкая стоимость:** Широкая доступность для массового потребителя.

3. Недостатки и ограничения

Ни одна технология не идеальна. У роторных дронов есть серьезные минусы:

I. **Низкая энергоэффективность и короткое время полета.** Это их главный недостаток. Большая часть энергии тратится на борьбу с гравитацией, а не на движение вперед. Типичное время полета — от 15 до 45 минут.

II. **Ограниченная скорость и дальность полета.** Они значительно уступают беспилотникам с неподвижным крылом по этим параметрам.

III. **Чувствительность к погоде.** Сильный ветер представляет серьезную проблему для стабильности полета.

2.2. Беспилотники самолётного типа

Беспилотник самолётного типа — это летательный аппарат без экипажа на борту, который по своей аэродинамической схеме повторяет классический самолёт. Он имеет неподвижное крыло, создающее подъёмную силу, и двигатель (или двигатели) для создания тяги.

Ключевое отличие от более привычных мультикоптеров (дронов с винтами) — **принцип полета**:

1. Принцип работы

А) Конструкция

Конструкция представляет собой самолет, а именно все составляющие самолёта

Держится в воздухе за счёт подъёмной силы, создаваемой крылом при движении вперёд. Как бумажный самолетик или пассажирский лайнер.

2. Ключевые преимущества

I. **Дальность и продолжительность полёта.** Это их главное преимущество. Аэродинамически эффективная конструкция позволяет им преодолевать сотни и даже тысячи километров и находиться в воздухе десятки часов без посадки.

II. **Высокая скорость.** Они летают значительно быстрее мультикоптеров.

III. **Энергоэффективность.** На перемещение по горизонтали тратится меньше энергии по сравнению с постоянным удержанием себя в воздухе, как это делают коптеры. Это позволяет использовать более разнообразные источники энергии (ДВС, солнечные батареи, водородные элементы).

IV. **Большая грузоподъёмность.** Могут нести более тяжёлое и габаритное оборудование (например, радары с синтезированной апертурой, высокоточные оптико-электронные системы).

V. **Устойчивость к погодным условиям.** Как правило, лучше справляются с ветром и турбулентностью благодаря аэродинамике и весу.

2. Недостатки и ограничения

I. **Требует взлётно-посадочной полосы или специального устройства для запуска.** Для взлёта и посадки им нужна площадка. Это может быть катапульта, рамповый стартер или обычная ВПП.

II. **Не могут зависать на месте.** Для выполнения задач, требующих статичного положения в воздухе (например, детальная съёмка небольшого объекта), они не подходят.

III. **Более сложное пилотирование и навигация.** Взлёт, посадка и полёт по сложному маршруту требуют либо опытного оператора, либо продвинутой системы автономного управления.

IV. **Обычно дороже** сопоставимых по классу мультикоптеров из-за более сложной конструкции и систем.

Классификация

БПЛА самолётного типа можно классифицировать по разным признакам, но самый распространённый — **по массе и дальности полёта**:

- **Мини- и микро-БПЛА** (размах крыла до 1-2 м, полёт на несколько км) — для разведки на уровне роты/взвода.
- **Лёгкие (тактические)** (десятки кг, сотни км) — для решения тактических задач армии (разведка, наблюдение).
- **Средние (оперативно-тактические)** (сотни кг, тысячи км) — могут нести лёгкое вооружение.
- **Тяжёлые (стратегические)** (вес в тонны, неограниченная дальность, 24+ часа в воздухе) — например, американские **Global Hawk**, **RQ-4**. Используются для глобальной разведки.
- **Боевые УБС (Ударные Беспилотные Комплексы)** — например, американские **MQ-9 Reaper**, турецкие **Bayraktar TB2**. Могут нести ракеты и бомбы для поражения целей.

2.3. **Беспилотники смешанного типа**

1. Принцип работы

Принцип основан на переходе между двумя режимами полета:

- **Режим вертикального взлета и посадки:** Аппарат использует подъемные двигатели (как у мультикоптера) или поворачивает свои винты/двигатели вертикально. Он взлетает, зависает и маневрирует подобно дрону.
- **Режим горизонтального полета:** После набора высоты аппарат переходит в самолетный режим. Двигатели или целые крылья с винтами поворачиваются вперед (становясь тянущими/толкающими). У моделей с раздельными силовыми установками отключаются подъемные двигатели, и в работу вступает хвостовой маршевый двигатель, обеспечивающий высокоскоростной полет. Подъемная сила создается за счет аэродинамики неподвижного крыла.

Процесс полета: Взлет (вертикально) -> Плавный переход в горизонт (поворот двигателей) -> Крейсерский полет (как самолет) -> Снижение и переход в режим зависания -> Посадка (вертикально).

2. Ключевые преимущества

- **Универсальность базирования:** Не нужна взлетно-посадочная полоса. Может взлетать с корабля, крыши автомобиля, небольшой поляны или труднодоступной местности.
- **Высокая эффективность крейсерского полета:** В самолетном режиме расход энергии значительно ниже, чем у мультикоптера. Это напрямую увеличивает **дальность, продолжительность полета и полезную нагрузку**.
- **Скорость:** Летает быстрее традиционных мультикоптеров (часто в 2-3 раза и более).
- **Гибкость применения:** Способность зависать для детального осмотра объекта или ведения наблюдения, а затем быстро перемещаться на новую позицию.
- **Улучшенная устойчивость в полете:** В самолетном режиме меньше подвержен влиянию ветра, чем мультикоптер.

3. Недостатки и ограничения

- **Сложность конструкции и высокая стоимость:** Наличие поворотных механизмов (сервомоторы, сложная кинематика) или двух типов двигателей делает аппарат дороже в производстве и обслуживании.
- **Повышенная уязвимость:** Большее количество движущихся частей и сложность системы снижают общую надежность по сравнению с простыми мультикоптерами.
- **Сложность пилотирования и управления:** Требуются более продвинутые алгоритмы автопилота для обеспечения безопасного перехода между режимами. Оператору нужна дополнительная подготовка.
- **Больший вес и габариты:** Наличие крыла и дополнительных систем делают аппарат крупнее и менее портативным.
- **Энергозатратность режима зависания:** В режиме висения он расходует энергию так же неэффективно, как и мультикоптер, что ограничивает время работы на месте.

Смешанный тип БПЛА представляет собой компромисс между маневренностью мультикоптера и эффективностью самолета, находя свою нишу в задачах, где критически важны и дальность, и возможность работы без инфраструктуры.

2.4. **Беспилотники аэростатного типа**

Беспилотники аэростатного типа — это летательные аппараты легче воздуха, которые для создания подъемной силы используют подъемный газ (гелий, водород) или теплый воздух. Ключевое отличие от других БПЛА — **статичность**: они не имеют крыльев и двигателей для создания аэродинамической подъемной силы, а просто "висят" в воздушной массе.

Основная задача: Длительное патрулирование, наблюдение и ретрансляция сигналов на большой высоте или на малой, но строго заданной позиции.

1. Принцип работы

Принцип работы основан на **законе Архимеда**: аэростат наполняется газом, плотность которого меньше плотности окружающего воздуха, что создает выталкивающую силу, поднимающую аппарат.

Подъемная сила: Создается за счет разницы в плотности.

- **Гелий/Водород:** Несжимаемые газы, обеспечивают постоянную подъемную силу. Гелий безопасен, но дорог, водород дешев, но горюч.
- **Теплый воздух:** Нагрев воздуха внутри оболочки (горелка) делает его менее плотным, что и создает подъемную силу (как в классическом воздушном шаре).

Управление и стабилизация:

- **Высота:** Контролируется путем сброса балласта (для подъема) или стравливания части подъемного газа (для спуска). В тепловых аэростатах — интенсивностью нагрева воздуха.
- **Положение в пространстве:** Многие современные беспилотные аэростаты оснащаются **стратостатными системами**. Это означает, что они не борются с ветром, а используют его. Аппарат поднимается на нужный высотный слой, где дует ветер в требуемом направлении, и "плывет" по течению. Для точного удержания позиции могут использоваться маломощные электрические двигатели с винтами.
- **Энергоснабжение:** Солнечные панели на оболочке или баллоне обеспечивают питание для полезной нагрузки и систем управления практически неограниченное время.

2. Ключевые преимущества

I. **Экстремальная продолжительность полёта.** Это главное преимущество. Время нахождения в воздухе измеряется **неделями, месяцами и даже годами**. Пока цела оболочка и есть энергия от солнца, аэростат может выполнять свою миссию.

II. **Высокая энергоэффективность.** Основная энергия тратится не на удержание в воздухе (как у самолета или мультикоптера), а на работу полезной нагрузки и систем связи. Это делает их идеальными платформами-ретрансляторами.

III. **Стабильность платформы.** Отсутствие вибраций от двигателей делает аэростаты идеальными носителями для высокочувствительных радаров, радиоэлектронных систем и оптики с большим увеличением.

IV. **Относительно низкая стоимость.** Производство и эксплуатация аэростата значительно дешевле, чем самолета-разведчика или спутника с аналогичными функциями.

V. **Большая грузоподъемность.** Позволяют поднимать в стратосферу тяжелое и габаритное оборудование.

3. Недостатки и ограничения

I. **Низкая маневренность и уязвимость.** Аэростат — медленная, крупная и уязвимая цель. Он не может уклониться от угрозы (погодной или военной). Для защиты требуется прикрытие истребительной авиации или систем ПВО.

II. **Сильная зависимость от погодных условий.** Сильный ветер, ураганы, обледенение могут повредить оболочку или сорвать аэростат с позиции. Запуск также возможен только в определенных метеоусловиях.

III. **Ограниченная управляемость.** Траекторию полета сложно кардинально изменить. Аппарат в значительной степени зависим от воздушных потоков, что делает его непригодным для задач, требующих активного маневрирования над точкой.

IV. **Сложность эксплуатации.** Запуск и особенно посадка аэростата для обслуживания или смены полезной нагрузки — сложная и рискованная процедура, требующая специальной инфраструктуры и обученной команды.

V. **Проблемы с регулированием воздушного движения.** Большой, медленный и слабоуправляемый объект представляет серьезную угрозу для гражданской авиации, что накладывает ограничения на его использование в оживленном воздушном пространстве.

Итог

Беспилотные аэростаты — это узкоспециализированный, но незаменимый инструмент для задач, где ключевыми параметрами являются **"висеть"**, **"видеть"** и **"вещать"** максимально долго и стабильно. Они не заменяют самолеты или коптеры, а дополняют их, заполняя свою уникальную нишу в системе воздушных средств.

Глава 3. Сферы применения

Беспилотные летательные аппараты применяются во многих сферах нашей жизни: от доставки грузов до сельского хозяйства. Ниже будет представлена структурированная информация о всех сферах применения БПЛА.

3.1. Сферы применения беспилотников роторного типа

- Инспекция в статике и на малой скорости: Осмотр объектов инфраструктуры (ЛЭП, трубы, фасады, мосты), тепловизионный контроль.

Точная аэросъемка и картография малых площадей: Фото/видео для СМИ, кино, риэлторов, создание 3D-моделей зданий.

- Мониторинг и наблюдение в режиме "стоп-кадра": Патрулирование, охрана периметра, наблюдение за скоплениями людей.
- Логистика в городах: Доставка малогабаритных грузов (аптечки, документы) на короткие расстояния.
- Поисково-спасательные операции (локальные): Поиск людей с тепловизором в лесу, обследование завалов.
- Сельское хозяйство (точечное): Прицельное опрыскивание, мультиспектральная съемка для анализа здоровья растений.
- Осмотр: Осмотр ангаров, цехов, емкостей.

3.2. Сферы применения беспилотников самолётного типа

- Масштабная аэрофотосъемка и картография: Создание ортофотопланов и цифровых моделей местности (ЦММ) для больших территорий (поля, карьеры, леса, города).
- Мониторинг протяженных объектов: Патрулирование трубопроводов, ЛЭП, границ, побережий.
- Геологоразведка и геодезия: Аэрофотосъемка для составления карт, магнитная и радиометрическая разведка.

• Дальняя разведка и наблюдение: Военное и гражданское применение (например, мониторинг лесных пожаров на огромных площадях).
• Доставка грузов на дальние расстояния: Между населенными пунктами, в труднодоступные районы.
• Метеорология и экологический мониторинг: Забор проб воздуха, отслеживание климатических изменений

3.3. Сферы применения беспилотников смешанного типа

• Логистика на средние и дальние расстояния без инфраструктуры: Доставка грузов и медикаментов в удаленные районы, где нет взлетных полос (горы, острова, нефтяные платформы).
• Морской мониторинг**:** Взлет/посадка с палуб малых судов для патрулирования акваторий, контроля за рыбохозяйственной деятельностью, поиска судов.
• Сложные инспекционные задачи: Облет протяженных объектов (трубопроводов) с возможностью зависнуть для детального осмотра дефекта.
• Тактическая разведка для силовых структур: Запуск с неподготовленных площадок, длительный полет на большой территории с возможностью детального изучения цели на месте.
• Картография труднодоступных районов: Где нет места для взлетно-посадочной полосы, но нужен охват большой площади (тайга, горные районы).

3.4. Сферы применения беспилотников аэростатного типа

• Квазистационарное наблюдение и ретрансляция: Привязные аэростаты или дирижабли как "воздушные вышки" для видеонаблюдения, связи (LTE/5G)
• Научные исследования в стратосфере: Стратосферные аэростаты для астрономических, климатических, геофизических исследований.
• Длительный экологический мониторинг: Постоянный забор данных о составе атмосферы.
• Реклама и освещение**:** Привязные аэростаты с дисплеями или прожекторами для крупных событий.

Глава 4. Роль БПЛА в создании трехмерных моделей местности.

Существует множество различных сфер применения БПЛА, однако, я хочу рассказать про одну конкретную.

Для создания точных трёхмерных моделей больших территорий, таких как стройплощадки, карьеры или промышленные зоны, сегодня эффективно применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолётного типа. Ярким примером служит аппарат «Геоскан 701».

Его ключевое преимущество — возможность проведения высокодетальной аэрофотосъёмки с высоты до 4500 метров. БПЛА оснащён камерой, обеспечивающей сверхвысокое разрешение снимков (например, 20+ мегапикселей), что превосходит качество многих профессиональных фотоаппаратов. Автоматически следуя заданному маршруту, БПЛА делает кадры с большим боковым и продольным перекрытием (60-80%). Именно это перекрытие является основой для фотограмметрии.

Полученные невероятно качественные снимки с привязкой к координатам и точными данными о положении аппарата в пространстве загружаются в специализированное программное обеспечение для фотограмметрии, такое как Agisoft Metashape (представлено как основное приложение для работы со снимками выполненными дронами компании Геоскан).

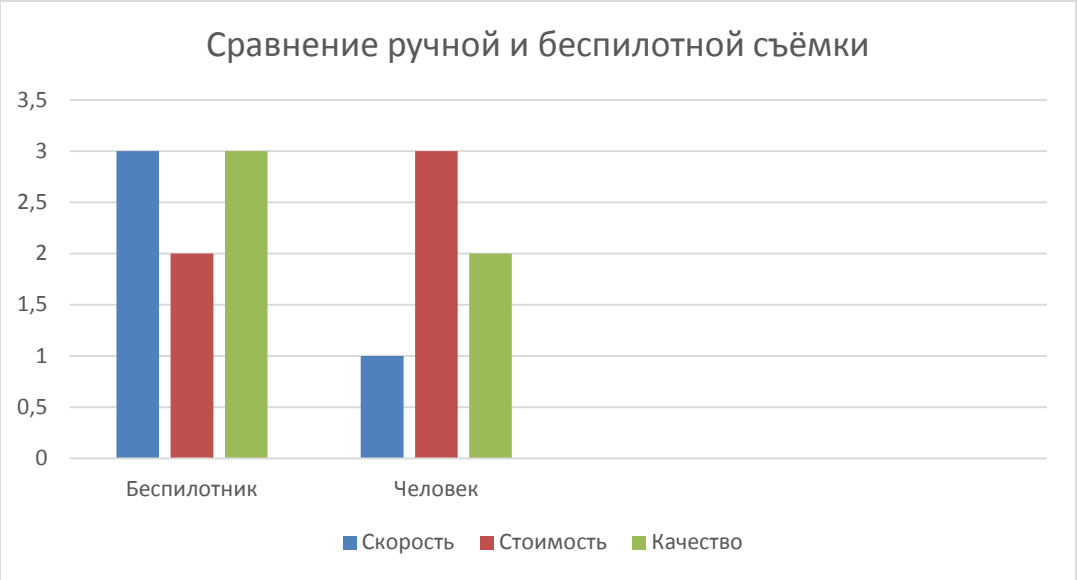


«Геоскан 701».



Фотография, снятая на «Геоскан 701». Место съёмки – г. Бор. (см. Приложение 1.)

Таким образом БПЛА самолётного типа превращается в мощный инструмент для цифровизации реального мира, который в разы ускоряет и удешевляет процесс создания 3D-моделей больших объектов (стройплощадок, промышленных зон) по сравнению с методами топографической съёмки или ручным лазерным сканированием.



Заключение

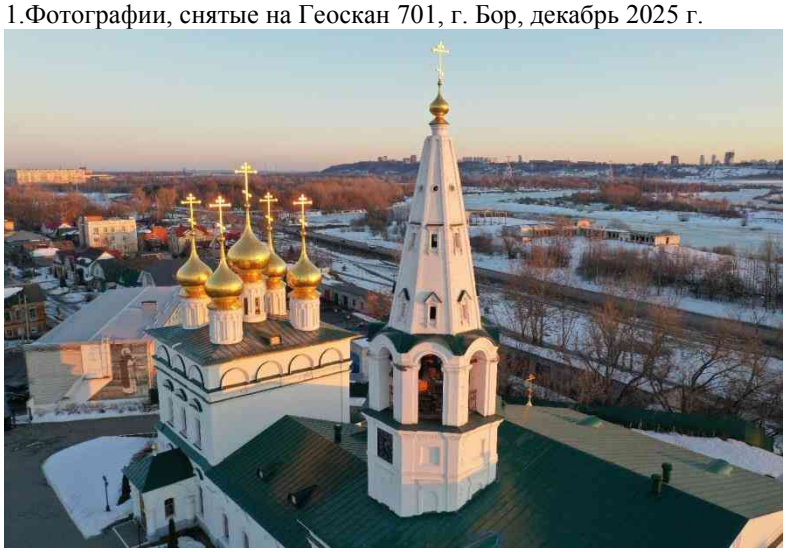
В ходе выполнения данного исследовательского проекта была достигнута поставленная цель: проведён анализ современных технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и определены ключевые направления их эффективного применения.

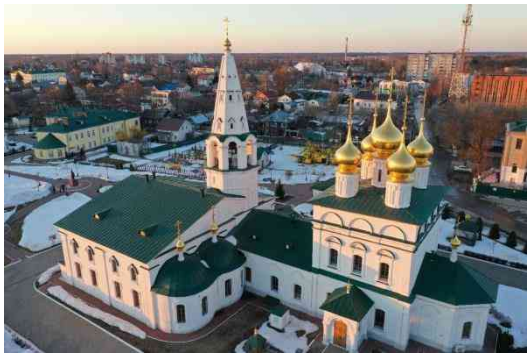
Современные БПЛА представляют собой не единую технологию, а целое семейство разнородных аппаратов, каждое из которых оптимально решает свой круг задач. Их стремительное развитие и проникновение во все сферы жизни — от обороны до сельского хозяйства является не временной тенденцией, а устойчивой технологической революцией.

Таким образом, беспилотные летательные аппараты прочно вошли в XXI век как один из ключевых инструментов технологического прогресса. Их будущее развитие будет определяться не только совершенствованием физических данных, но и способностью человека находить для них новые, умные и полезные применения на благо общества.

Приложения

1.Фотографии, снятые на Геоскан 701, г. Бор, декабрь 2025 г.





Список литературы:

1. Биард Р. У., МакЛэйн Т. У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Пер. с англ. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. — 312 с. — ISBN 978-5-94836-393-6
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный_летательный_аппарат
3. https://www.geoscan.ru/ru
4. https://kronshtadt.ru/
5. https://discuss.ardupilot.org/
6. https://dronedj.com/
7. https://www.dji.com/ru
8. Особенности конструкции и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов самолетного типа [Текст] / Под ред. А.И. Тищенко. — М.: Машиностроение, 2017. — 288 с. — ISBN 978-5-94275-823-9

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА СПУТНИКА НА ОСНОВЕ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

Рохмистрова О.А.
МБОУ «Лицей № 15 имени академика Юлия Борисовича Харитона» г. Саров

Введение

Космические исследования являются одним из ключевых направлений современной науки и инженерии. Однако производительность современных космических аппаратов упирается в фундаментальные ограничения бортовых вычислительных систем: недостаточный объём памяти и вычислительной мощности для обработки больших данных на орбите, высокое энергопотребление, а также задержки при передаче информации на Землю. Эти ограничения, обусловленные жёсткими массогабаритными требованиями и автономностью питания, снижают оперативность и автономность миссий, особенно тех, что требуют принятия решений в реальном времени (например, мониторинг стихийных бедствий, маневрирование вдали от Земли).

Бурное развитие квантовых вычислений открывает принципиально новые возможности для решения сложных вычислительных задач. Квантовые компьютеры обладают

потенциалом для экспоненциального ускорения в области оптимизации, машинного обучения и моделирования сложных систем благодаря таким свойствам, как квантовый параллелизм и запутанность. Их интеграция в космические системы выглядит логичным шагом для преодоления вычислительного барьера.

Первые шаги в этом направлении уже сделаны. В 2016 году китайский спутник «Мо-Цзы» продемонстрировал защищённую квантовую связь между континентами. Позднее, в 2018 году, эксперимент NASA Cold Atom Lab на МКС начал изучение квантовых явлений в условиях микрогравитации. В июне 2025 года в рамках миссии Transporter-14 ракетой-носителем SpaceX Falcon 9 на орбиту был выведен первый в мире спутник, оснащённый квантовым компьютером. Целью миссии являлась экспериментальная проверка работоспособности квантового вычислителя в условиях космического пространства. Квантовый компьютер выступал в роли полезной нагрузки, в то время как управление спутником осуществлялось классической бортовой цифровой вычислительной машиной. Данный эксперимент подтвердил принципиальную возможность функционирования квантовых устройств на орбите. Однако во всех перечисленных миссиях квантовые устройства выступали либо как инструмент для безопасной передачи данных, либо как объект фундаментального исследования.

Таким образом, на сегодняшний день остаётся неисследованной принципиальная возможность использования квантового компьютера в качестве штатного бортового вычислительного ядра для решения прикладных задач самой космической миссии. В рамках данного проекта будет рассмотрена модель возможного космического аппарата на основе квантового компьютера и часть его функционала.

Цель проекта – разработка концепции и моделирование прототипа космического аппарата (КА), в архитектуре которого квантовый компьютер выполняет роль центрального вычислительного модуля, с последующим описанием принципов его функционирования.

Задачи проекта:

1. Провести анализ общих принципов построения современных космических аппаратов и архитектур квантовых компьютеров для выявления ключевых ограничений и точек интеграции.
2. Определить целевой функционал и назначение разрабатываемого КА, исходя из потенциальных преимуществ квантовых вычислений и технологических ограничений.
3. Выполнить проектирование и трёхмерное моделирование строения прототипа аппарата, обеспечивающего работоспособность ключевых систем, включая размещение квантового процессора.
4. Разработать и описать базовые алгоритмические сценарии работы КА, демонстрирующие взаимодействие квантового вычислительного ядра с классическими подсистемами.
5. На основе проведённого моделирования сделать предварительные выводы об ожидаемых энергозатратах, эффективности (КПД) и экономической целесообразности реализации подобной технологии.

Для реализации поставленных задач был применен комплекс методов компьютерного моделирования и программной разработки.

1. Анализ аналогов. На первом этапе был проведен сравнительный анализ архитектур современных космических аппаратов и существующих платформ квантовых процессоров.
2. Трехмерное моделирование конструкции. Для проектирования и визуализации прототипа спутника использовалась система автоматизированного проектирования КОМПАС-3D.
3. Программное моделирование логики работы. Для описания и симуляции алгоритмов работы аппарата использовался язык Python и библиотеки NumPy, SciPy, Qiskit и Matplotlib.

Обзор литературы

Современный космический аппарат представляет собой сложный инженерный комплекс, чья архитектура формируется под конкретные целевые задачи – от научных исследований и дистанционного зондирования Земли до навигации и связи. Независимо от миссии, все спутники объединяет наличие общих служебных подсистем, обеспечивающих их базовую жизнедеятельность на орбите. Ключевыми из них являются:

1. Система управления с бортовым вычислительным комплексом. Основой функционирования аппарата служит бортовой вычислительный комплекс. Он включает в себя бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ), которая осуществляет обработку поступающих с Земли команд, управление служебными системами, сбор и первичную обработку телеметрической и научной информации. Его вычислительная мощность, надёжность и энергоэффективность

являются критическими параметрами, непосредственно влияющими на возможности всей миссии. Традиционные бортовые компьютеры, основанные на классических полупроводниковых процессорах, сталкиваются с фундаментальными ограничениями, особенно в контексте задач, требующих обработки больших объёмов данных или решения сложных оптимизационных проблем в реальном времени. Эти ограничения становятся ещё более выраженными для миссий в дальнем космосе, где задержка связи с Землёй измеряется часами, и аппарат должен действовать максимально автономно.

2. Система ориентации и стабилизации. Она обеспечивает правильное положение аппарата в пространстве. Состоит из датчиков, определяющих ориентацию (солнечные, звёздные датчики, гироскопы, магнитометры), и исполнительных органов, которые эту ориентацию корректируют. В качестве последних могут использоваться маховики, газовые реактивные двигатели малой тяги или магнитные катушки, создающие момент за счёт взаимодействия с магнитным полем Земли.

3. Двигательная установка. Служит для коррекции орбиты, манёвров уклонения и, в некоторых случаях, для перехода на конечную орбиту. На малых спутниках всё чаще применяются экономичные и долговечные электрореактивные двигатели (ионные, плазменные), которые, однако, имеют малую тягу.

4. Система электропитания. Энергетический бюджет является одним из главных ограничивающих факторов при проектировании космического аппарата. Источником энергии в подавляющем большинстве случаев служат солнечные батареи, чья эффективность и площадь жёстко ограничены конструкцией. Всё бортовое оборудование, от систем связи до научных приборов, должно укладываться в строгие лимиты энергопотребления.

5. Система связи. Обеспечивает радиосвязь с наземными станциями, включая приём команд управления и передачу на Землю потока научных и служебных данных. Важнейшей характеристикой является пропускная способность канала, которая часто является узким местом, ограничивающим объём передаваемой информации.

6. Система терморегулирования. Является особенно важной, так как в вакууме космоса теплообмен возможен только излучением. Поддерживает температурный режим в диапазоне, допустимом для работы электроники и научной аппаратуры. Для этого используется пассивная теплоизоляция (многослойная экранно-вакуумная теплоизоляция), радиаторы для сброса избыточного тепла, а также активные элементы – нагреватели и холодильники.

Классификация космических аппаратов часто ведётся по массе, что косвенно отражает их размеры, сложность и энергетические возможности. В контексте интеграции новых, требовательных к ресурсам технологий, таких как квантовые вычисления, малые платформы — например, кубсаты или микроспутники — сталкиваются с непреодолимыми трудностями. Их скромные массогабаритные характеристики и ограниченная поверхность для размещения солнечных батарей не позволяют обеспечить энергоснабжение и теплоотвод для масштабных экспериментальных систем. Поэтому для подобных задач логичнее рассматривать более крупные аппараты — так называемые средние или даже тяжелые платформы. Такие спутники обладают значительным внутренним объёмом, большей площадью для солнечных панелей и более развитыми системами терморегулирования, что потенциально позволяет разместить и обеспечить работу сложного и энергоёмкого оборудования.

Важнейшим ограничивающим фактором при проектировании является строго лимитированный энергобюджет, определяемый площадью и эффективностью солнечных батарей. Все системы должны укладываться в эти жёсткие рамки потребления.

Параллельно с развитием космических технологий происходит революция в области вычислительной техники, связанная с появлением квантовых компьютеров. Их работа основана не на классических битах, а на кубитах – квантовых битах, которые благодаря принципу суперпозиции могут находиться не только в состояниях «0» или «1», но и в их линейной комбинации обоих базисных состояний. Это означает, что система из N кубитов может теоретически обрабатывать 2^N возможных состояний параллельно, что и лежит в основе потенциального экспоненциального превосходства квантовых вычислений для определённого класса задач, например, оптимизации, моделирования молекулярных систем или машинного обучения на порядки быстрее, чем на самых мощных классических суперкомпьютерах. Второе ключевое явление – квантовая запутанность, которая позволяет устанавливать корреляции между состояниями кубитов, даже если они пространственно разнесены. Это явление используется для реализации квантовых алгоритмов и протоколов связи.

Преимущества квантовых вычислений заключаются в возможности принципиально нового подхода к решению задач, которые практически не поддаются классическим компьютерам. К таким задачам относятся: симуляция квантовых систем (молекул, материалов), что критически важно для химии и фармакологии; решение сложных задач оптимизации в логистике, финансах и машинном обучении; факторизация больших чисел, что лежит в основе современных криптографических протоколов. Для космического аппарата наиболее актуальными могли бы стать задачи автономной оптимизации маршрута, обработки больших массивов научных данных непосредственно на борту (например, сжатие изображений или выделение полезного сигнала из шума) и решения сложных навигационных уравнений.

Физическая реализация кубитов является крайне сложной инженерной задачей. Наиболее продвинутые на сегодняшний день платформы включают в себя сверхпроводящие кубиты, представляющие собой микроскопические сверхпроводящие контуры, и кубиты на ионных ловушках, где в роли кубитов выступают отдельные ионы, удерживаемые в вакууме электромагнитными полями. Также ведутся активные исследования в области фотонных и полупроводниковых кубитов. Независимо от платформы, все современные квантовые процессоры для своей работы требуют создания и поддержания экстремальных условий. Сверхпроводящие кубиты, например, должны охлаждаться до температур, близких к абсолютному нулю (около 10-20 милликельвинов), что достигается с помощью сложных многоступенчатых криостатов, использующих жидкий гелий. Это делает систему охлаждения громоздкой, энергоёмкой и чувствительной.

Помимо требований к температуре, кубиты часто подвергаются декогеренции, то есть потере своего квантового состояния. Они чрезвычайно чувствительны к любым внешним воздействиям: тепловым колебаниям, электромагнитным помехам, вибрациям и, что особенно актуально для космоса, ионизирующему излучению. Космическая радиация может вызывать ошибки в вычислениях и даже необратимые повреждения чувствительных элементов. Время, в течение которого кубит сохраняет когерентность, пока слишком мало для выполнения длинных вычислений.

Также, современные квантовые процессоры подвержены высокому уровню ошибок, что требует разработки и применения методов квантовой коррекции ошибок, что, в свою очередь, увеличивает требуемое количество кубитов и сложность управления.

Таким образом, квантовый процессор – это не просто замена классического чипа. Это целая инфраструктура, включающая криогенную установку, сложные системы управления и экранирования. Его интеграция в космический аппарат потребует радикального пересмотра традиционной архитектуры спутника. Необходимо будет выделить значительную часть массового и энергетического бюджета на обеспечение работы этого модуля, разработать специальные решения для его радиационной защиты и термостабилизации, а также создать новые интерфейсы для взаимодействия квантового и классического вычислительных контуров. Поэтому проект, направленный на такую интеграцию, с необходимостью фокусируется не на миниатюрных, а на более крупных и ресурсообеспеченных космических платформах, способных выступить в роли летающей лаборатории для отработки этой перспективной технологии.

Расчёты

Для перехода от концепции к техническому проектированию выполнен комплекс взаимосвязанных расчётов, определяющих облик, возможности и ограничения прототипа космического аппарата (КА). Все расчёты базируются на анализе существующих технологий, физических законах и реалистичных инженерных допущениях.

1. Выбор базовой платформы и обоснование массового бюджета.

Современные сверхпроводящие квантовые процессоры (например, от IBM или Google) для работы требуют температуры порядка 10–20 милликельвин. Эта температура достигается в многоступенчатых криогенных холодильниках (демпферных или разбавленных). Масса и габариты наземной лабораторной установки, включая криостат, компрессоры и систему управления, измеряются сотнями килограмм и кубометрами. Также для космического применения необходимо существенное сокращение массы и объёма. Ориентиром могут служить криогенные системы для инфракрасных телескопов (например, на спутнике «James Webb»). Однако их задача — охлаждение матрицы до ~7 К, что проще. Для достижения 0.01 К потребуется более сложная система. Примем, что в результате целенаправленной разработки массу криогенного модуля с процессором удастся снизить до 200–300 кг. Это ключевое допущение, определяющее весь дальнейший расчёт.

Проанализировав классы КА можно утверждать, что минимально необходимой платформой для соответствия требованиям по массе и энергии является средний спутник (500-2500 кг). Предположительно, спутник должен весить около 800 кг: 250 кг полезной нагрузки (целевой квантовый модуль и вспомогательная научная аппаратура), 350 кг служебных систем (ботовой комплекс управления, система ориентация и стабилизации, корпус, комплекс связи, двигательная установка), 150 кг системы электропитания (солнечные батареи и аккумуляторы), 50 кг системы терморегулирования (радиаторы, тепловые трубы).

2. Детальный расчёт для СЭП

Основные потребители энергии на борту – квантовый модуль (криогенная система требует около 3 кВт, электроника около 0.5 кВт) и служебные системы платформы (около 0.7-1.2 кВт). То есть за один орбитальный виток требуется примерно 5.5 кВт. Средняя мощность за час $P_{ср} = 4.2$ кВт.

Аппарат работает на околоземной орбите с периодом затемнения длительностью около 30 минут. Рассчитаем необходимую мощность.

Энергия, расходуемая в тени: $E_{тень} = P_{ср} * 0.5$ ч $= 2.1$ кВт * ч. За время освещения солнечные батареи должны обеспечить текущее потребление и восполнить заряд, потраченные в тени, то есть $P_{солн.батарей} = 4.2+2.1 = 6.3$ кВт. С учётом КПД системы около 85% и изнашиваемости (k=0.8) начальная мощность должна быть приблизительно равна 6.3 / (0.85*0.8) = 9.26 кВт.

В качестве солнечных батарей предполагается использование трёхкаскадных арсенид-галлиевых (GaAs) элементов. Их удельная мощность на СОО составляет ~250 Вт/м². Необходимая площадь, в таком случае равна 9260 Вт / 250 Вт/м² ≈ 36.6 м². Такие батареи будут представлять собой 2 развёртываемые панели длиной около 4-5 м.

Требуется запасать энергию 2.1 кВт*ч. Для литий-ионных батарей космического класса допустима глубина разряда не более 30%, тогда полная необходимая ёмкость E=2.1/0.3=7 кВт*ч. Удельная энергоёмкость таких аккумуляторов около 150 Вт*ч/кг, а необходимая масса M=7000 Вт*ч / 150 Вт*ч/кг = 46.7 кг.

3. Детальный расчёт для системы терморегулирования.

Основной источник тепла – криогенная система, КПД которой около 10%. Тепловыделение остальной электроники имеет КПД около 90%, таким образом общая тепловая нагрузка составляет Q = (3.5 кВт/0.1) + (1 кВт * 0.1) = 36 кВт.

В космосе тепло рассеивается только излучением. Мощность излучения с поверхности радиатора можно рассчитать по формуле Стефана-Больцмана. При использовании пассивных радиаторов с рабочей температурой 0°C мощность излучения с одного квадратного метра составляет примерно 267 Вт. Требуемая площадь пассивных радиаторов $S_{радиаторов} = 36000$ Вт / 267 Вт/м^2 = 134.8 м^2. Такая площадь слишком велика для выбранного класса КА. Если температура радиаторов будет равна 50°C, мощность изучения станет равна 525 Вт/м^2, требуемая площадь снизится до 68.6 м^2.

4. Оценка стоимости проекта.

Основной спутника будет унифицированная служебная платформа среднего класса (например, типа «Навигатор» или «Канопус-В»). Она включает в себя корпус, систему ориентации, двигательную установку, стандартные системы электроснабжения и терморегулирования. Её стоимость и стоимость адаптации для научной миссии составит около 1.5 млрд рублей. После необходимых преобразований СЭП и СТР стоимость составить 2.2 млрд рублей. Квантовый вычислительный модуль включает в себя криогенную систему, квантовый процессор и изоляцию. По средним оценкам, его стоимость составит около 3.5 млрд рублей. На испытания, разработку ракеты-носителя и запуск спутника потребуется ещё около 4 млрд рублей. Таким образом, общая стоимость с учётом резерва в 15% составит 11.2 млрд рублей.

Высокие затраты обусловлены разработкой нестандартных систем, и данный бюджет сравним с бюджетом национальных космических миссий.

5. Сравнительная таблица спутниковых платформ с использованием квантового модуля и без него

Параметр	Базовая платформа	Платформа с квантовым модулем
Масса служебных систем	350 кг	350 кг
Масса полезной нагрузки	100–150 кг	250 кг (квантовый модуль + вспомогательная аппаратура)
Общая масса КА	500–600 кг	800 кг
Объём под полезную нагрузку	0.5–0.8 м³	1.2 м³ (увеличен за счёт корпуса)
Среднее энергопотребление	0.5–1.0 кВт	4.2 кВт
Пиковая мощность СБ	1.5–2.5 кВт	9.3 кВт
Площадь СБ	6–10 м²	36.6 м²
Тепловыделение	0.5–1.0 кВт	36 кВт
Площадь радиаторов	2–5 м²	68.6 м²
Тип системы терморегулирования	Пассивная	Активная (с теплоносителем)

Служебные системы остаются без изменений, так как их функции не зависят от наличия квантового модуля. Основные изменения затрагивают увеличение массы и объёма полезной нагрузки, масштабирование систем энергоснабжения и терморегулирования под высокое энергопотребление и тепловыделение криогенной установки, а также переход от пассивного к активному отводу тепла.

6. Итоговые результаты и вывод

Результаты всех расчётов приведены в таблице.

Параметр	Расчётное значение
Класс аппарата	Средний
Стартовая масса	800 кг
Среднее энергопотребление	4.2 кВт
Пиковая мощность СБ	9.26 кВт
Площадь СБ	36.6 $м^2$
Ёмкость аккумуляторов	7 кВт*ч
Тепловая нагрузка	36 кВт
Площадь радиаторов	68.6 $м^2$
Ориентировочная стоимость	11.2 млрд рублей

Проведённые оценки подтверждают, что создание прототипа спутника с квантовым компьютером возможно на базе платформы среднего класса. Однако реализацию значительно усложняет разработка компактной и энергоэффективной криогенной системы и высокопроизводительной системы отвода тепла.

Моделирование

Для моделирования спутника использовалась программа «Компас-3D v23». Модель строения спутника представлена в приложении.

Спутник был смоделирован с учётом габаритов, которые были рассчитаны ранее:

Деталь	Размеры (м)	Цвет
Центральный корпус	1.6*1.2*1.2	Прозрачно-серый
Квантовый модуль	0.8*0.8*1	Голубой – изоляция Синий – криостат Чёрный – процессор
Панели солнечных батарей (2 шт.)	4.6*4*0.5	Фиолетовый
Панель радиатора	3*2*0.3	Белый
Ионный двигатель	R=0.2, h=0.4	Серый

Программная реализация

Для демонстрации принципов работы прототипа были разработаны три программные модели, имитирующие ключевые процессы на борту спутника с квантовым компьютером. Модели реализованы на языке Python с использованием библиотеки Qiskit для квантовых вычислений. Они показывают, как квантовый модуль может решать задачи оптимизации ресурсов, управления и связи в реальном времени. Код программ представлен в приложении.

1. Оптимизация энергопотребления.

На борту спутника работает несколько систем с разным энергопотреблением: криогенная (3.5 кВт), связь (0.3 кВт), ориентация (0.15 кВт), научная аппаратура (0.25 кВт). Их суммарное потребление (4.2 кВт) равно установленному лимиту, но в реальности могут быть пиковые нагрузки. Необходимо найти, какие системы можно временно перевести в экономичный режим (снизить потребление на 10%), чтобы остаться в рамках лимита при пиковой нагрузке.

Задача оптимизации распределения мощности между n системами при наличии ограничений относится к классу NP-трудных задач. Классические алгоритмы точного решения, такие как метод ветвей и границ, имеют временную сложность $O(2^n)$ в худшем случае. Для n=20 систем, что реалистично для бортового комплекса, полный перебор требует около миллиона итераций, что занимает секунды или даже минуты. Эвристические методы, такие как генетические алгоритмы, работают быстрее – порядка тысяч итераций, но не дают гарантии оптимальности решения. Квантовый алгоритм QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm) использует суперпозицию кубитов для параллельной обработки всех 2^n состояний. Сложность алгоритма составляет $O(p \cdot poly(n))$, где p – глубина квантовой цепи (обычно 2–5). Для n=20 и p=3 количество требуемых операций исчисляется сотнями. При этом квантовый подход обеспечивает приближённое решение с доказуемыми границами точности. Таким образом, при масштабировании задачи на реальное число параметров квантовое ускорение может достигать 1000–10000 раз по сравнению с классическим полным перебором и в 10–100 раз по сравнению с эвристическими методами.

Каждой системе сопоставляется бинарная переменная (кубит):

0 = система работает в номинальном режиме

1 = система переведена в экономичный режим (потребление снижено на 10%)

Целевая функция, которую нужно минимизировать:

$H = \Sigma [-\Delta P_i * x_i] + \lambda * (\Sigma P_i * x_i - L)^2$

где:

ΔP_i – экономия от перевода системы i в экономичный режим

$X_i \in \{0,1\}$ – бинарная переменная

λ – штрафной коэффициент за превышение лимита

L – энергетический лимит (4.2 кВт)

Задача преобразуется в гамильтониан – квантовый оператор, собственные значения которого соответствуют значениям целевой функции. Строится параметризованная квантовая цепь (ansatz), которая пробует различные комбинации состояний кубитов. Классический оптимизатор (COBYLA) меняет параметры цепи так, чтобы минимизировать среднее значение гамильтониана. После оптимизации цепь измеряется –получается битовая строка (например, 1010), где 1 указывает, какую систему нужно перевести в экономичный режим.

Вывод программы – график сравнения потребления до и после оптимизации и график распределения вероятностей всех возможных решений.

2. Квантовое маневрирование.

Спутнику необходимо выполнить коррекцию орбиты и сообщить приращение некоторой скорости. Ионные двигатели могут выдавать импульс разной величины. Необходимо выбрать такой импульс, чтобы обеспечить необходимую скорость и минимизировать время работы двигателя. В квантовом виде это представляется как поиск оптимального угла в параметризованной квантовой цепи.

Выбор оптимального импульса двигателя из дискретного набора M вариантов – задача комбинаторной оптимизации. Классический подход требует последовательного перебора всех M вариантов. При M=32 это 32 расчёта динамики полёта, что допустимо. Однако при переходе к высокоточному управлению, когда число возможных импульсов достигает 128 или 512, время перебора может стать критическим для автономного принятия решений в реальном времени. Квантовый алгоритм VQE (Variational Quantum Eigensolver) использует суперпозицию кубитов для одновременной оценки всех вариантов. Требуемое число кубитов равно $\log_2 M$: для 128 вариантов достаточно 7 кубитов. Алгоритм находит минимум за 50–200 итераций, каждая из которых требует одного запуска квантовой схемы. Независимо от числа вариантов, количество итераций растёт полиномиально. Для M=128 классический перебор требует 128 расчётов, а квантовый подход – порядка 100 запусков, что даёт выигрыш в 1.3 раза. Для M=512 классический перебор требует 512 расчётов, а квантовый – всё те же 100–200 запусков, что даёт выигрыш уже в 2.5–5 раз. Кроме того, VQE может использоваться для задач с непрерывными переменными, где классический перебор невозможен в принципе.

Квантовый алгоритм VQE работает следующим образом. Пространство поиска (6 возможных импульсов) кодируется в состояниях 3 кубитов ($2^3 = 8$ состояний, 6 полезных). Цепь EfficientSU2 создаёт достаточно сложное состояние, способное представлять любую суперпозицию. Алгоритм SPSA находит параметры цепи, соответствующие оптимальному импульсу. Измеренные кубиты дают бинарный код, который преобразуется в индекс импульса. Программа находит оптимальный импульс для заданных условий, рассчитывает время работы двигателя и строит график динамики этого манёвра.

3. Квантовая связь.

Задача программы заключается в передаче бинарной последовательности с защитой от прослушивания. В классической связи перехватчик может просто скопировать сигнал. В квантовой связи любая попытка измерения изменяет состояние, что сразу обнаруживается.

В этой задаче главное преимущество – не вычислительное ускорение, а фундаментальная защита от перехвата. Классические системы шифрования, такие как AES-256, обеспечивают вычислительную стойкость, но теоретически уязвимы для квантовых атак. Алгоритм Гровера позволяет ускорить перебор ключа в $\sqrt{N}$ раз, снижая эффективную стойкость AES-256 с 2^{256} до 2^{128} операций. Согласно оценкам, квантовый компьютер с 10^4 логическими кубитами может взломать AES-256 за часы или дни. Протоколы квантового распределения ключей (QKD), такие как B92, основаны на законах физики. Любая попытка перехвата необратимо изменяет квантовое состояние. Для протокола B92 вероятность обнаружения одного перехваченного кубита составляет 25%. После процедур исправления ошибок и усиления секретности (постобработки) вероятность того, что перехват останется незамеченным, снижается до менее 1%. Это качественное преимущество, недостижимое классическими методами. В количественном выражении: при передаче ключа длиной 10^5 бит вероятность необнаруженного перехвата составляет менее 10^{-40}, что практически гарантирует безопасность. Скорость генерации ключа на спутниковых линиях, как показано на примере китайского спутника «Мо-Цзы», достигает 1 Мбит/с, что достаточно для большинства практических применений.

Протокол B92 использует 2 неортогональных состояния: $|\psi_0\rangle = |+\rangle$ для передачи 0 и $|\psi_1\rangle = |-\rangle$ для передачи 1. Каждый бит преобразуется в соответствующее квантовое состояние с помощью вращений операторами H и Rz. Приёмник случайно выбирает базис измерения, по результатам которого восстанавливается бит. Также программа визуализирует состояния на сфере Блоха.

Разработанные программы демонстрируют практическую применимость квантовых вычислений для решения актуальных задач бортовых систем: оптимизации ограниченных ресурсов, управления и защищённой связи. Модели подтверждают, что интеграция квантового

компьютера в архитектуру спутника позволяет перейти от пассивного сбора данных к активному интеллектуальному управлению миссией.

Заключение

Выводы и результаты:

1. Проведённый сравнительный анализ архитектур космических аппаратов и квантовых процессоров подтвердил теоретическую возможность их интеграции для решения задач оптимизации и обработки данных на борту. Ключевым выводом является выявление фундаментального противоречия: высокие требования квантовых систем к охлаждению, стабильности и энергопитанию вступают в конфликт с жёсткими ограничениями космического аппарата по массе, габаритам и энергобюджету.
2. В качестве наиболее целесообразной платформы для прототипа был обоснован выбор космического аппарата среднего класса (массой более 500 кг). Это обусловлено необходимостью обеспечения значительного энергоснабжения и теплоотвода для криогенной системы квантового процессора, что непосильно для малых спутников (кубсатов).
3. Разработана концептуальная архитектура и создана трёхмерная модель прототипа аппарата в среде КОМПАС-3D. Модель наглядно демонстрирует реализуемость компоновки, включая выделенный защищённый отсек для квантового процессора с системой термостабилизации, что является практическим результатом проектирования.
4. Успешно разработана и протестирована программная модель на Python с использованием библиотек Qiskit, NumPy и Matplotlib. Модель реализует полный цикл: постановку задачи классическим бортовым компьютером, её решение на симулированном квантовом процессоре и анализ результатов. Это доказало принципиальную работоспособность программного интерфейса между классическими и квантовыми подсистемами.
5. На основе проведённого моделирования и анализа сделана предварительная оценка, показывающая, что интеграция квантового модуля приведёт к существенному увеличению энергопотребления (на 30-50%) и сложности систем терморегулирования аппарата. В то же время, потенциальный выигрыш в скорости решения специализированных задач открывает путь к качественному повышению автономности и интеллектуальности космических миссий.

В результате выполненной работы была достигнута поставленная цель – разработана концепция и смоделирован прототип космического аппарата с квантовым компьютером в качестве центрального вычислительного модуля. Получены следующие ключевые результаты: концептуальная архитектура, демонстрирующая возможность интеграции; работоспособная 3D-модель прототипа в среде КОМПАС-3D; а также действующий программный симулятор на Python, моделирующий логику совместной работы классических и квантовых подсистем. Для задачи оптимизации квантовый подход даёт ускорение в тысячи раз при масштабировании на реальное число параметров. Для задачи манёвра преимущество проявляется при высокоточной дискретизации и составляет от 2 до 5 раз. Для задачи связи преимущество качественное – обнаружение перехвата с вероятностью более 99%, что невозможно реализовать классическими средствами. Таким образом, использование квантового компьютера на борту спутника позволяет решать задачи, которые либо требуют слишком много времени на классическом процессоре, либо принципиально не имеют классического аналога по уровню безопасности. Эти результаты доказывают принципиальную реализуемость предложенного подхода и формируют конкретную основу для дальнейших прикладных исследований в области бортовых квантовых вычислений. Дальнейшее развитие проекта связано с углублённым математическим моделированием систем охлаждения и энергобаланса, а также с проработкой конкретных инженерных решений для радиационной защиты квантового процессора в условиях космического полёта.

Приложение

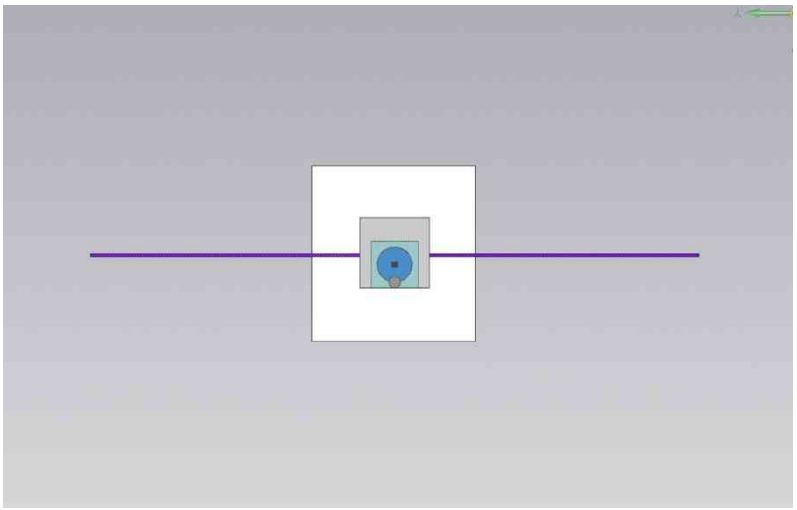


Рис. 1. Вид спереди

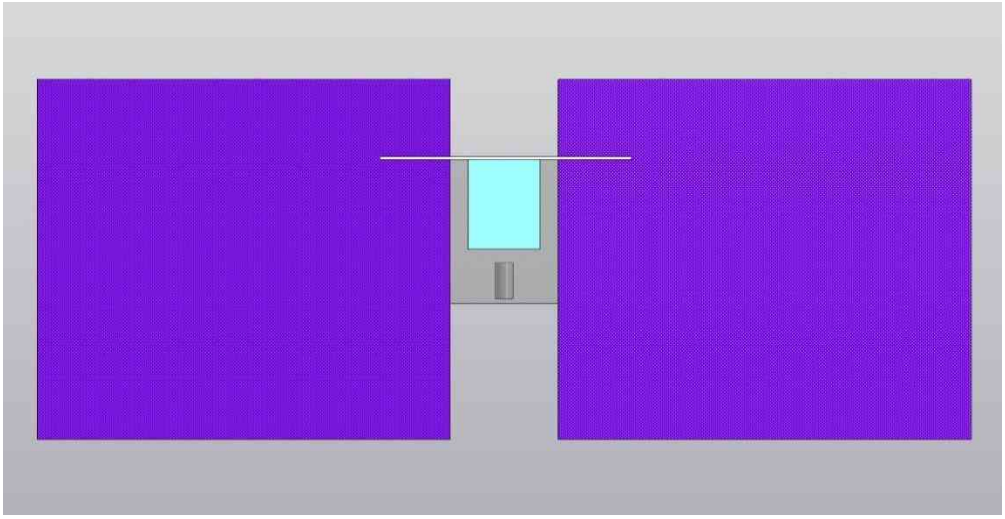


Рис. 2. Вид сверху

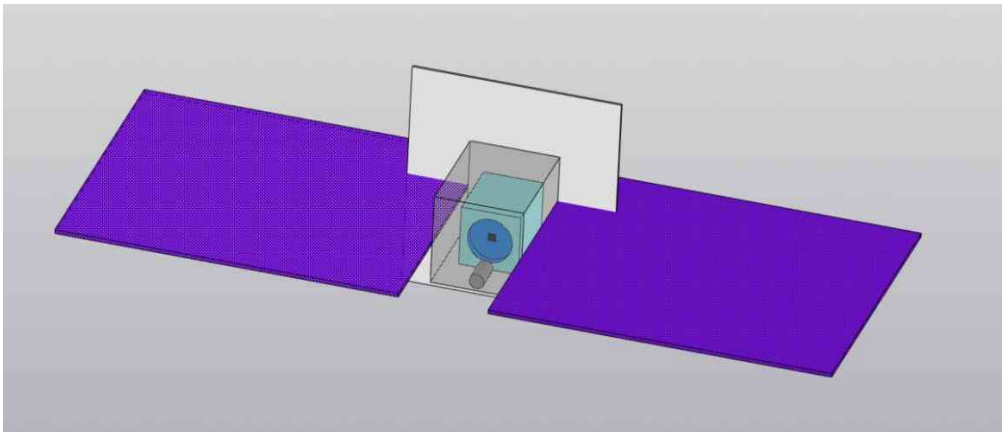


Рис. 3. Вид сбоку

Список литературы:
1. Ю.Я. Пузин, С.Л. Сафронов. Основы устройства и эксплуатации космических комплексов. // ФГАОУ Самарский университет, 2022.
2. А.В. Крамлих. Модульное проектирование микро/наноспутников. // ФГАОУ Самарский Университет, 2010.
3. И.Д. Козин, И.Н. Федулина. Искусственные спутники Земли. // Некоммерческое акционерное общество «Алматинский университет энергетики и связи», 2014.
4. С.В. Абламейко, В.А. Саечников, А.А. Спиридонов. Малые космические аппараты. // Белорусский государственный университет, 2012.
5. В. Петров. Искусственный спутник земли. // М.: Наука, 1958.
6. А.С. Гончар, М.Ю. Бакулин, А.В. Бычков. Перспективы использования квантовых технологий в космических системах связи и дистанционного зондирования. // Журнал «Космическая техника и технологии», 2021 – № 4(33).
7. А.В. Куренков, А.С. Королёв. Квантовые вычисления и коммуникации: вызовы для космических приложений. // Труды МФТИ, 2022 – Т.14, № 1.
8. Farhi, E., Goldstone, J., Gutmann, S. (2014). A Quantum Approximate Optimization Algorithm.
9. Crooks, G. E. (2018). Performance of the Quantum Approximate Optimization Algorithm on the Maximum Cut Problem.
10. NASA Cold Atom Lab Mission Overview – https://www.nasa.gov/mission/station/research-explorer/
11. Quantum Experiments on the International Space Station – https://www.esa.int/
12. The Nobel Prize in Physics 2022 - Popular science background - NobelPrize.org, https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/popular-information/
13. Quantum Data - PennyLane, https://pennylane.ai/datasets/
14. https://www.roscosmos.ru/

КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОСТОЙ МОДЕЛИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Самодолов Л.А.
МБОУ «Лицей № 15 имени академика Юлия Борисовича Харитона» г. Саров

Введение

Компьютерное моделирование стало ключевым инструментом в науке, инженерии и образовании. Оно позволяет исследовать процессы, которые невозможно провести в лаборатории, дает возможность тестировать теоретические модели до проведения экспериментов. Одним из важнейших процессов в изучении ударных взаимодействий (высокоскоростные удары, столкновение метеоритов, гидравлические удары, взрывные процессы и др.) является возникновение ударных волн. Для наглядного и простого изложения в настоящей работе рассматривается упрощенный случай динамического сжатия.

Теоретическая часть

Компьютерное моделирование ударных волн основано на численном решении дифференциальных уравнений и в целом является сложным для понимания школьников. В данной работе рассматривается упрощенный случай динамического сжатия [1], на примере которого изложены основные принципы, используемые в теоретическом и экспериментальном исследовании ударных волн, вводятся некоторые термины и иллюстрация их физического смысла.

Простая модель ударной волны

Представим себе некое «вещество», состоящее из системы несжимаемых кубиков массой m с длинной ребра a, лежащей цепочкой на расстоянии b друг от друга на плоскости, по которой они могут перемещаться без трения.

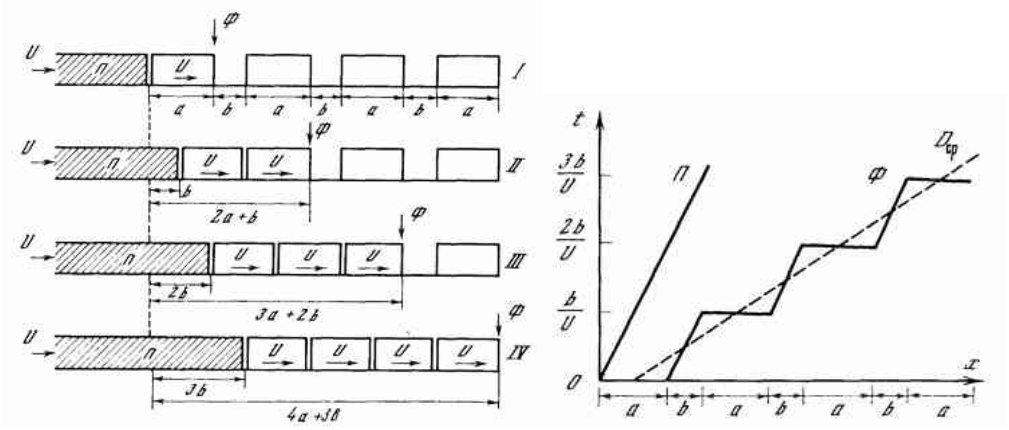


Рисунок 1 – Модель сжатия твердого тела. График фронта ударной волны. x – расстояние, t- время, пунктиром указано усредненное движение фронта

Пусть слева на право с постоянной скоростью *U* движется поршень *П*. В момент времени t=0 поршень касается первого кубика и вовлекает его в движение с той же скоростью U. Предположим, что все соударения происходят неупруго, т.е. тела не отскакивают друг от друга, а «слипаются» в единое целое. Поэтому слипшийся кубик приобретает скорость U мгновенно. Через время t= b/U, необходимое для прохождения промежутка между кубиками шириной b, движущийся впереди поршня кубик сомкнется со вторым кубиком и приведет его в движение со скоростью U. В момент времени t= 2b/U придет в движение третий кубик и т.д. Таким образом поршень разгоняет вещество по частям до скорости **U**. Эту скорость можно назвать **массовой скоростью вещества** (физическая скорость движения массы вещества). Описанную выше картину движения можно назвать **ударной волной** [1].

Рассматривая модель, мы в каждый момент времени можем указать положение передней границы движущегося вещества. В реальных ударных волнах переднюю границу, разделяющую уже движущееся и еще неподвижное вещество, называют **фронтом ударной волны** (см. рисунок 1, Ф). Скорость перемещения фронта ударной волны называют **скоростью фронта**, или **скоростью ударной волны (D)**. В нашей модели (рисунок 1) фронт движется скачками- промежутки между кубиками шириной b он проходит со скоростью U, а в момент касания мгновенно перескакивает на переднюю грань следующего кубика, т.е. на расстояние a.

Средняя скорость движения фронта равна: Dcp = (a+b)/Δt = (a/b + 1)*U. Из формулы видно, чем сильнее может сжаться вещество, тем ближе скорость ударной волны к массовой скорости вещества за фронтом, и наоборот.

Рассмотрим изменение плотности вещества в ударной волне. В нашем упрощенном примере плотность модельной среды имеет размерность массы на единицу длины. Средняя плотность до сжатия имела значение ro = m/(a+b), а после сжатия r1 = m/a. Тогда отношение плотностей можно выразить в виде: r1/r0 = 1+1/((Dcp/U)-1) = Dcp/(Dcp-U). Из этой формулы видно, что плотность в ударной волне возрастает. В нашем примере плотность возрастает всегда на одну и туже величину, в реальных ударных волнах степень сжатия зависит от интенсивности ударной волны.

Компьютерная реализация модели ударной волны

Компьютерное моделирование ударных волн предполагает численную реализацию физико-математической модели с помощью специализированного программного обеспечения. Для написания программы я использовал язык программирования C++ [2] библиотеку SFML [3] – это графическая библиотека для отрисовки 2D-объектов, работы с окнами, работа с мышью и т.п.

Для более наглядного отображения процесса распространения ударной волны, несколько модернизируем предложенную модель. Заменим блоки на шарики, сделаем их не в один ряд, а в несколько. Так же, двигающий поршень, из рассмотренной модели, заменим на нажатие клавиши мыши на любой из кругов. В результате нажатия на клавишу мыши, от этого шарика будет распространяться ударная волна. Иллюстрация движения фронта ударной волны реализована путем смены цвета шарика.

Основы, заложенные в программу:

- Для каждого шарика введен уникальный индекс.

- При нажатии мыши на шарик рассчитываются времена смены цвета для остальных шариков, исходя из заданных заранее размеров шаров, расстояния между ними и скорости U.
- Возможность нажатия на любой шарик.
- Смена цвета шарика на случайно выбранный.
- Быстрое задание количества шариков, их размеры и расстояние между ними.
- Вывод на экран скорости шариков U и скорости ударной волны D.

Время смены цвета для каждого шарика насчитывается по формуле time = b / U, где $b^2 = (X\text{-}coodX)^2 + (Y\text{-}coodY)^2$, X и Y – координаты шарика на который нажали мышью.

Приведем динамику распространения ударной волны, рисунок 2.

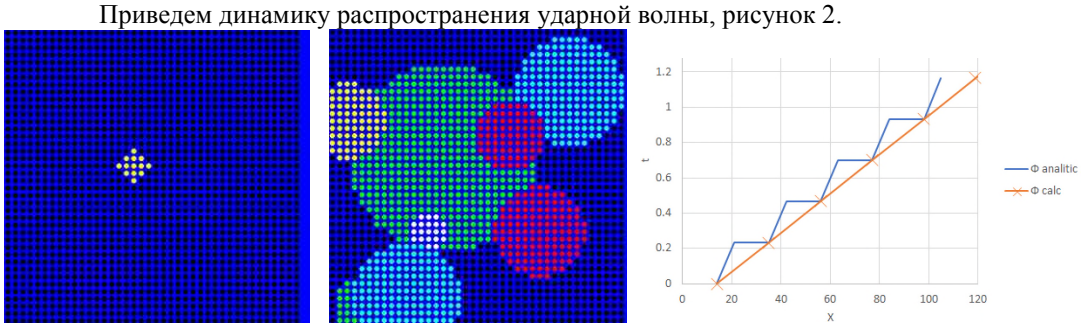


Рисунок 2 – Динамика распространения ударной волны и график фронта ударной волны

Изначально все шарики закрашены черным цветом на синем фоне, при нажатии на клавишу мыши, цвет шарика меняется на случайный (не синий), происходит расчет времен смены цвета, и при достижение этого времени происходит постепенная закраска шариков. Время работы программы реализовано в секундах, с помощью функции *clock()*. Для проверки правильности запрограммированных формул приведем график фронта ударной волны Ф полученной в программе и сравнение с аналитическим решением, рисунок 2. Из графика видно, что аналитической решение и значения полученный в результате выполнения программы совпадают.

Установим взаимосвязь между скоростью ударной волны D и массовой скорость вещества U. Изменим расстояние между шариками (величину b). Результаты работы программы приведены в таблице.

b=1	D=450	U=30	r1/r0=1.07
b=6	D=100	U=30	r1/r0=1.42
b=12	D=65	U=30	r1/r0=1.85

Из рисунка таблицы видно, что, увеличивая расстояние межу шариками скорость ударной волны D и массовая скорость вещества U становятся ближе друг к другу, и наоборот. Другими словами, чем более жестким, слабо сжимаемым, является вещество, тем больше скорость ударной волны будет превосходить скорость, с которой вещество движется за фронтом ударной волны. Так же можно заметить, отношение плотностей до сжатия и после r1/r0 возрастает с увеличением расстояния b, т.е. вещество становится более сжимаемым.

Заключение

Компьютерное моделирование физических процессов кардинально изменило подход к научным исследованиям и инженерным разработкам. Оно позволяет изучать ранее недоступные явления, экономит время и ресурсы, даёт возможность прогнозировать.

Одним из важнейших процессов в изучении ударных взаимодействий является возникновение ударных волн. В данной работе был рассмотрен пример некоторого условного вещества, используя который можно построить модель ударной волны – модель динамического сжатия тела. Эта модель показывает, что применение законов механики позволяет установить связь между кинематическими (скорость волны, массовая скорость) и термодинамическими (плотность) характеристиками среды. Совершенно аналогичный подход используется при изучении ударных волн в реальных веществах.

Я реализовал упрощенную модель ударной волны используя язык программирования C++ и библиотеку SFML. Создал компьютерную модель. Меняя быстро входные параметры модели, я установил, что чем сильнее может сжаться вещество, тем ближе скорость ударной волны к массовой скорости вещества за фронтом, и наоборот.

Список литературы:
1. Ударные кратеры на Луне и планетах. А.Т. Базилевский. М.: Наука ,1983.
2. Язык программирования C++ / Б. Страуструп; пер. с англ. — 4-е изд. — Санкт-Петербург: Вильямс, 2016. — 1136 с.
3. Haller J., Hansson H. V., Moreira A. SFML Game Development. — Birmingham: Packt Publishing, 2013. — 314 с.

КОД СОРТИРОВКИ

Орлова Е.А., Яхонтова К.О.
МАОУ СШ №9 с углублённым изучением отдельных предметов, г. Павлово

Ведение

В настоящее время вопрос экологии становится всё более актуальным [1-4]. Один из простейших шагов, который может предпринять каждый человек, — сортировка мусора. Однако даже это действие выполняется не всегда должным образом.

Цель проекта — автоматизация процесса сортировки мусора для повышения эффективности утилизации и переработки материалов.

Задачи:
1. Исследовать и проанализировать требования.
2. Разработать концепцию устройства.
3. Выбрать технологию распознавания видов отходов.
4. Обучить нейросеть распознавать типы мусора.
5. Создать программное обеспечение.
6. Провести тестирование и калибровку.
7. Разработать систему питания.
8. Создать и протестировать прототип.

Актуальность: проект направлен на улучшение состояния окружающей среды с использованием технологий искусственного интеллекта — мы предлагаем решение экологической проблемы через создание «Умной урны».

Новизна: роботизация сортировки мусора — новая и недостаточно развитая область в России. Она может повысить эффективность переработки отходов и снизить затраты на их обработку.

Объект исследования — нейросеть, способная различать и сортировать отходы.

Предмет — умная урна, улучшающая экологию.

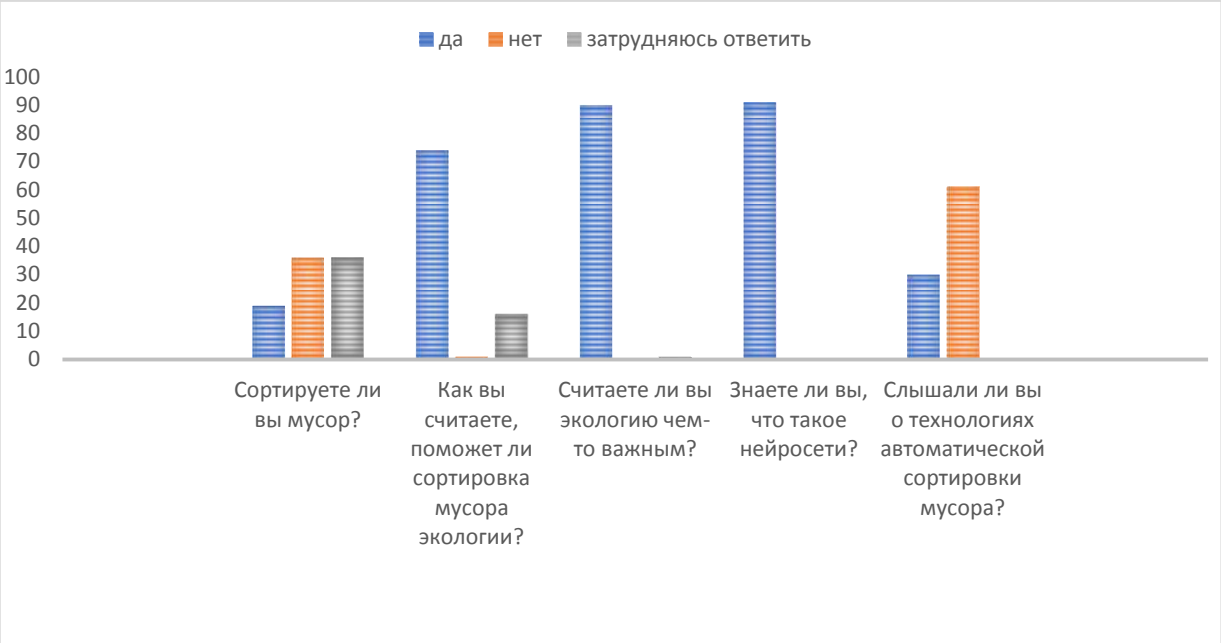
Гипотеза: создание умной урны «Код сортировки» поможет улучшить состояние окружающей среды, упростить и повысить эффективность сортировки отходов.

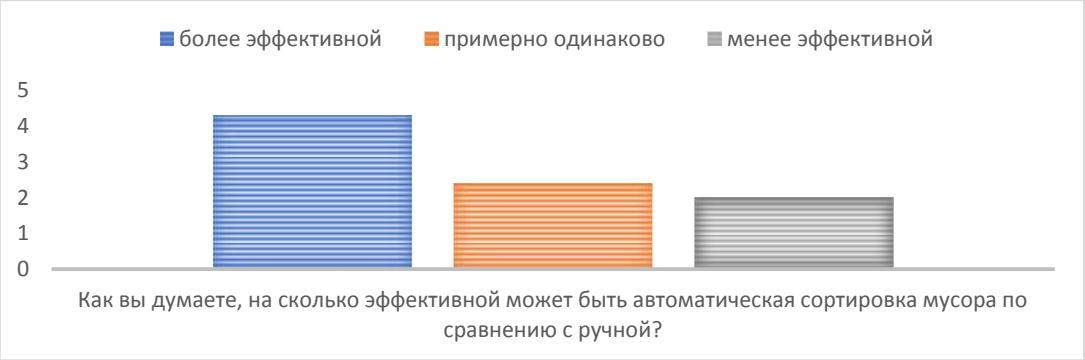
Методы:
- опрос и анализ экологической ситуации;
- использование сенсоров и датчиков (оптических, инфракрасных, камер);
- компьютерное зрение (машинное обучение, нейронные сети);
- алгоритмы сортировки (обработка данных и изображений);
- механизмы сортировки (механические и электромагнитные системы);
- обеспечение энергетической автономии (солнечные, ветровые источники);
- тестирование и оптимизация;
- сбор обратной связи.

Основная часть

Теоретическая часть

Для изучения экологической ситуации проведён опрос среди обучающихся и родителей школы. Результаты представлены в виде диаграмм.





Проект предполагает внедрение инновационных технологий в сферу переработки отходов, что улучшит экологическую обстановку и повысит эффективность городских систем.

Перспективы проекта

1**. Улучшение качества переработки**. Автоматизированные системы сортировки на основе ИИ и машинного зрения позволят точнее разделять отходы (пластик, стекло, металл, бумага, органика), получая чистое вторсырьё.

- Преимущества: увеличение объёмов переработанного сырья, снижение загрязнения, повышение экономической эффективности.
- Примеры технологий: оптические и роботы-сортировщики, системы машинного обучения.

2. **Снижение затрат на переработку**. Автоматизация процессов и оптимизация логистики сократят операционные затраты. Энергоэффективное оборудование уменьшит расходы на электроэнергию.

- Преимущества: повышение рентабельности предприятий, возможность снижения тарифов, привлечение инвестиций.
- Примеры технологий: автоматизированные линии сортировки, системы мониторинга маршрутов мусоровозов, энергоэффективные дробилки и прессы.

3. **Интеграция с умными городами**. Система переработки отходов может быть интегрирована с инфраструктурой умного города: отслеживание объёмов и состава мусора в реальном времени, оптимизация графиков вывоза, повышение осведомлённости жителей.

- Преимущества: улучшение экологии, повышение комфорта жителей, снижение нагрузки на полигоны, создание новых рабочих мест.
- Примеры технологий: сенсоры для мониторинга заполненности контейнеров, мобильные приложения для жителей, платформы для анализа данных об отходах.

Ключевые сложности и решения:

1. **Разнообразие мусора**. Разработка гибких алгоритмов машинного обучения, комбинация технологий сортировки (оптическая, механическая, пневматическая), образовательные программы для населения.
2. **Условия освещения.** Использование специализированных камер и систем освещения, устойчивых к изменению условий; алгоритмы обработки изображений, компенсирующие влияние освещения.
3. **Скорость обработки.** Высокопроизводительное оборудование, оптимизированные алгоритмы обработки данных.
4. **Стоимость.** Поиск финансирования, разработка бизнес-моделей для окупаемости, использование модульных систем для поэтапного внедрения.

Для создания успешного проекта мы изучили опыт других инноваций.

Название	Описание	Плюсы	Минусы
Мультимедийная мусорная урна	Бесплатный интернет, данные геолокации, рекламный и информационный носитель	Улучшение сортировки отходов, удобство использования	Высокая стоимость большое потребление электроэнергии
ZenRobotics	Сортировка строительных отходов	Высокая точность, увеличение скорости сортировки	Высокая стоимость установки и обслуживания, ограниченная способность обрабатывать сложные смеси отходов
AMP Robotics	Сортировка мусора на перерабатывающих заводах	Адаптация к разным типам отходов, улучшение качества переработки	Зависимость от исходных данных, зависимость от постоянного технического обслуживания
Waste Robotics	Сортировка мусора с помощью роботов и ИИ	Высокая скорость обработки мусора, возможность интеграции с существующими системами переработки	Необходимость в дорогих и качественных деталях высокого качества, долгое время обучения роботов

Практическая часть

В ходе работы создан прототип умной урны «Код сортировки».

Ход работы:

1. **Приём мусора**. Мусоровоз высыпает содержимое в приёмный бункер, откуда мусор попадает на конвейерную ленту.
2. **Сканирование и распознавание**. Камера с ИИ определяет тип мусора (пластик, стекло, бумага и т.д.) для каждого предмета на ленте.
3. **Сортировка.** Конвейерная лента разветвляется на отдельные линии для разных типов мусора.
4. **Раздельные контейнеры**. В конце каждой линии стоит контейнер для отсортированного мусора.

Детали устройства:

- пневматические системы для выброса мусора в контейнеры;
- роботизированные манипуляторы для точной сортировки сложных объектов;
- заслонки и направляющие для направления мусора;
- контейнеры для разных категорий мусора;
- прочный корпус, устойчивый к погодным условиям.

Заключение

Экологические проблемы требуют срочных решений. Разработка урн с нейросетью для автоматической сортировки мусора важна для эффективной утилизации и защиты окружающей среды.

Проект имеет огромный потенциал для улучшения экологии и повышения эффективности городских систем. Успешная реализация требует комплексного подхода, учитывающего технологические, экономические, социальные и нормативные аспекты.

Гипотеза подтвердилась: создание умной урны «Код сортировки» упростило процесс сортировки отходов и сделало его более эффективным, что способствует улучшению состояния окружающей среды.

Список литературы:

1. Пример проекта умной мусорки [https://habr.com/ru/articles/927466]
2. Пример проекта умной урны для сортировки мусора [https://pt.2035.university/project/proekt-serii-ekologia?ysclid=mel66zc00292592765]
3. Усманова Т. Х., Хасанова А. И., Хайруллина Л. И. «Инновационные технологии для решения экологических проблем в мировом сообществе» // «МИР (Модернизация. Инновации. Развитие)». 2017. Т. 8. №1. С. 115–121.
[https://www.mir-nayka.com/jour/article/viewFile/726/731]
4. Ж. Ю. Хаустова, А. В. Румянцева, «Инновационная деятельность как аспект решения экологических проблем»
[https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/122678/1/sueb_2023_016.pdf]

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИИНСТРУМЕНТА (БОТА) ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ

Мотов А.Д., Загороднюк Ю.А.
МБОУ «Школа №168 имени И.И.Лабузы», г .Нижний Новгород

Введение

Современное школьное образование требует постоянного совершенствования и адаптации к новым вызовам и потребностям учеников. Перегруженность учебных программ, необходимость индивидуального подхода и стремление повысить мотивацию учащихся — лишь некоторые из актуальных проблем. Цифровые технологии предоставляют уникальные возможности для их решения, позволяя персонализировать образовательный процесс и делать обучение более интересным и эффективным.

В этом контексте особенно важным становится создание специализированных цифровых инструментов для школьников. Чат-боты, благодаря своей интерактивности и доступности, могут стать эффективными помощниками в учебе, предоставляя доступ к учебным материалам, помогая в подготовке к экзаменам и обеспечивая персонализированную обратную связь [1].

Работа посвящена процессу разработки мультиинструмента для школьников в формате чат-бота. Основной акцент сделан на создании функционального и удобного приложения, которое упростит доступ к образовательным ресурсам, повысит продуктивность обучения и сделает его более увлекательным. Разработка опирается на современные технологии программирования, принципы проектирования пользовательского интерфейса и технологии искусственного интеллекта для персонализации обучения.

Цель исследования: Разработка мультиинструмента (бота) для школьников, ориентированного на повышение продуктивности в учебе и эффективную подготовку к экзаменам с акцентом на процесс разработки, используемые технологии и возможности персонализации обучения.

Задачи исследования:

1. Изучить современные технологии и платформы для разработки чат-ботов, а также возможности их применения в образовательном процессе.
2. Спроектировать архитектуру и структуру бота, обеспечивающие его функциональность, масштабируемость и удобство использования.
3. Реализовать основные функции бота с использованием современных языков программирования и инструментов разработки.

4. Разработать систему персонализации обучения на основе технологий искусственного интеллекта.
5. Внедрить механизмы геймификации и отслеживания прогресса для повышения вовлеченности учащихся.

Объект исследования: Процесс разработки мультиинструмента (бота) для школьников.

Предмет исследования: Технологии, методы и этапы разработки мультиинструмента (бота) для школьников, а также его функциональные возможности и влияние на образовательный процесс.

Гипотеза: Использование современных технологий и методов разработки позволит создать мультиинструмент (бота) для школьников с широким функционалом, удобным пользовательским интерфейсом, возможностями персонализации обучения и элементами геймификации. Это, в свою очередь, приведет к повышению продуктивности в учебе, росту мотивации к регулярным занятиям и улучшению подготовки к экзаменам.

Методы исследования:

1. Анализ научной литературы и существующих платформ для разработки чат-ботов.
2. Проектирование архитектуры и структуры бота.
3. Программирование и отладка функциональности бота.
4. Использование инструментов машинного обучения для создания системы персонализации обучения.
5. Применение методов геймификации для проектирования пользовательского опыта (UX).

Практическая значимость: Результаты исследования могут быть использованы для разработки и внедрения эффективных цифровых инструментов в образовательный процесс. Созданный бот может стать полезным помощником для школьников в учебе и подготовке к экзаменам. Разработанные методы и подходы к разработке могут применяться при создании других образовательных приложений.

1.**Теоретические основы разработки образовательных ботов**

1.1. Современные тенденции в образовательных технологиях

Современное образование находится в процессе активной цифровой трансформации. Традиционные методы обучения постепенно дополняются или заменяются новыми образовательными технологиями, что делает процесс обучения более доступным, интерактивным и эффективным. В последние годы можно выделить несколько ключевых тенденций в образовательных технологиях, влияющих на развитие учебного процесса, включая использование искусственного интеллекта, персонализированное обучение, цифровые образовательные платформы, игровые технологии и дистанционное обучение.

1.1.1. Искусственный интеллект в образовании

Одной из наиболее значимых тенденций является внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в образовательный процесс. ИИ позволяет:

- анализировать успеваемость учащихся и предлагать персонализированные рекомендации;
- автоматизировать проверку домашних заданий и тестов;
- обеспечивать интеллектуальные ассистенты и чат-боты, способные отвечать на вопросы учащихся в режиме реального времени.

Примером использования ИИ в образовании является адаптивное обучение, при котором система анализирует уровень знаний ученика и автоматически подбирает соответствующие материалы. Российские разработки в этой сфере включают платформу "Skyeng" с адаптивными курсами английского языка и проект "Яндекс.Учебник", использующий алгоритмы машинного обучения для помощи школьникам.

1.1.2. Персонализированное обучение

Современные технологии позволяют учитывать индивидуальные особенности каждого ученика, адаптируя учебный процесс под его уровень знаний, предпочтения и темп обучения. Персонализированное обучение реализуется через:

- интеллектуальные образовательные платформы, которые подбирают задания в зависимости от прогресса ученика;
- использование больших данных для анализа эффективности различных методов обучения;
- гибридные формы обучения, объединяющие онлайн- и офлайн-форматы.

Одним из примеров персонализированного обучения является система "ЯКласс", которая адаптирует задания под уровень ученика, помогая ему прорабатывать слабые места.

1.1.3. Развитие цифровых образовательных платформ

Цифровые образовательные платформы становятся ключевыми инструментами обучения. Они предоставляют доступ к курсам, учебным материалам, тестам и форумам для общения с преподавателями и другими учащимися. Среди наиболее популярных российских образовательных платформ можно выделить:

- "Российскую электронную школу" (РЭШ);
- "Учи.ру" — платформу для начальной и средней школы;
- "Stepik" — платформу для онлайн-курсов по программированию и другим предметам.

Развитие этих платформ способствует цифровизации образования и расширению возможностей дистанционного обучения.

1.1.4. Игровые технологии и геймификация

Геймификация — это применение игровых механик в образовательном процессе для повышения мотивации и вовлеченности учащихся. Примеры игровых технологий в образовании включают:

- системы достижения и наград (бейджи, уровни, рейтинги);
- интерактивные квесты и симуляции;
- виртуальную и дополненную реальность для изучения сложных предметов.

В России подобные технологии используются в проектах "Фоксфорд" и "Учиру", где задания подаются в игровой форме, что мотивирует учеников активнее заниматься.

1.1.5. Дистанционное и гибридное обучение

Пандемия COVID-19 стала катализатором развития дистанционного обучения, и сегодня оно продолжает развиваться. Основные направления дистанционного и гибридного образования включают:

- использование видеоконференций для проведения занятий в режиме реального времени;
- LMS (Learning Management Systems) для управления образовательным процессом (Moodle, Google Classroom, "Сферум");
- мобильные приложения и адаптивные сайты для самостоятельного обучения.

Гибридное обучение, сочетающее онлайн- и офлайн-методы, набирает популярность, так как позволяет ученикам сочетать традиционные занятия с цифровыми технологиями.

1.1.6. Чат-боты и виртуальные помощники в образовании

Развитие технологий искусственного интеллекта привело к появлению образовательных чат-ботов, которые могут:

- отвечать на вопросы учеников;
- помогать с подготовкой к экзаменам;
- проверять домашние задания и давать советы по их выполнению.

Примеры таких решений:

- "Алиса" от Яндекса, помогающая искать образовательные материалы;
- бот "Тьютор" на базе Telegram, предлагающий консультации по подготовке к ЕГЭ и ОГЭ;

1.2. Психолого-педагогические аспекты цифрового обучения

Современные образовательные технологии не только расширяют доступ к знаниям, но и значительно изменяют сам процесс обучения, воздействуя на когнитивные способности, мотивацию и психоэмоциональное состояние учащихся. Использование цифровых инструментов, включая образовательные платформы, интерактивные приложения и чат-боты, требует глубокого понимания психолого-педагогических аспектов их применения. В данном разделе рассмотрим ключевые принципы, которые необходимо учитывать при внедрении цифровых технологий в учебный процесс.

Индивидуализация и адаптивность обучения

Традиционные методы образования не всегда позволяют учитывать индивидуальные особенности учеников. Одни осваивают материал быстрее, другие нуждаются в дополнительной поддержке, третьи испытывают трудности с концентрацией внимания. Цифровые технологии позволяют решить эту проблему благодаря персонализированному подходу.

Современные образовательные платформы и чат-боты способны анализировать уровень знаний ученика, его ошибки и предпочтения в обучении, адаптируя материалы под его стиль восприятия информации. Например, алгоритмы могут изменять сложность заданий в

зависимости от результатов предыдущих тестов или предлагать дополнительное объяснение сложных тем.

Мотивация и вовлеченность учащихся

Одним из ключевых факторов успешного обучения является мотивация. Традиционные формы образования часто оказываются недостаточно интерактивными, что снижает интерес к предмету. В то же время цифровые технологии, включая геймификацию и интерактивные элементы, повышают вовлеченность учеников.

Основные механизмы цифрового обучения, влияющие на мотивацию:

- **Геймификация** – система баллов, наград, рейтингов, достижений и соревновательных элементов помогает повысить заинтересованность в обучении.
- **Интерактивные форматы** – использование анимации, видеоуроков, квестов, симуляторов делает образовательный процесс более увлекательным.
- **Обратная связь в реальном времени** – чат-боты и онлайн-платформы позволяют мгновенно получать комментарии к выполненным заданиям, что снижает уровень тревожности и помогает быстрее корректировать ошибки.

Исследования показывают, что учащиеся, использующие цифровые инструменты с элементами геймификации, демонстрируют более высокую мотивацию и лучше усваивают материал по сравнению с традиционными методами обучения.

Развитие самостоятельности и навыков самоконтроля

Цифровое обучение требует от учащихся большей самостоятельности. При традиционном обучении ученик ориентируется на объяснения учителя, в то время как в цифровой среде ему необходимо самому искать информацию, планировать время и анализировать результаты.

Использование образовательных чат-ботов и интерактивных платформ способствует развитию:

- **Навыков саморегуляции** – ученик самостоятельно выбирает темп обучения, ставит цели и отслеживает свой прогресс.
- **Критического мышления** – необходимость анализировать информацию, выбирать правильные источники и проверять достоверность данных.
- **Тайм-менеджмента** – работа с цифровыми платформами часто требует планирования учебного времени, особенно при подготовке к экзаменам.

Однако высокий уровень самостоятельности может стать и проблемой: не все ученики обладают достаточной самодисциплиной. Поэтому важно внедрять элементы контроля и поддержки, например напоминания о дедлайнах, автоматизированные рекомендации или систему уведомлений.

Когнитивная нагрузка и цифровая усталость

Одним из важных аспектов цифрового обучения является когнитивная нагрузка. Хотя интерактивные технологии могут облегчить восприятие информации, они также могут перегружать когнитивные ресурсы учащихся.

Факторы, влияющие на цифровую усталость:

- **Чрезмерное количество информации** – современные образовательные платформы предлагают огромный объем данных, что может затруднять их усвоение.
- **Отсутствие живого общения** – взаимодействие с чат-ботами и онлайн-курсами не всегда заменяет традиционное общение с преподавателем и одноклассниками.
- **Многозадачность** – частое переключение между задачами и источниками информации может снижать концентрацию внимания.

Для минимизации негативных последствий цифрового обучения необходимо соблюдать баланс между онлайн- и офлайн-форматами, применять методы когнитивного снижения нагрузки (например, структурирование информации, дозированное использование интерактивных элементов) и включать элементы социализации, такие как командные проекты или обсуждения в чате.

Социальные аспекты и взаимодействие с преподавателем

Хотя цифровые технологии способны значительно повысить качество обучения, они не могут полностью заменить живое взаимодействие между учеником и учителем. Исследования показывают, что наиболее эффективными являются гибридные модели, сочетающие цифровые инструменты с традиционными методами преподавания.

Преподаватель в цифровой среде играет роль модератора и наставника, помогая ученикам адаптироваться к новым технологиям и обеспечивая психологическую поддержку. Кроме того, чат-боты и онлайн-платформы могут быть эффективным дополнением к традиционному обучению, но не его заменой.

2. Разработка образовательного бота

2.1 Концепция и архитектура бота

Современные технологии становятся неотъемлемой частью образовательного процесса. Ученики все чаще используют гаджеты и мессенджеры для общения, поиска информации и организации учебы. Поэтому создание цифрового помощника в виде чат-бота для Telegram — логичное и удобное решение.

EduVerse Bot — это многофункциональный помощник для школьников, который помогает готовиться к экзаменам, следить за расписанием, получать полезную информацию и даже общаться с искусственным интеллектом по школьным предметам.

Разработка бота основывалась на нескольких ключевых принципах:

- **Доступность** – бот должен работать на любых устройствах без установки дополнительного ПО.
- **Простота использования** – интуитивно понятный интерфейс и взаимодействие через команды и кнопки.
- **Гибкость** – возможность добавлять новые функции без изменения существующих.
- **Персонализация** – бот адаптируется под потребности каждого ученика.

Для реализации этих принципов важно правильно выбрать платформу и технологии.

Почему выбран Telegram?

Telegram — один из самых популярных мессенджеров среди школьников и студентов. Он удобен, работает на всех устройствах и поддерживает чат-ботов с расширенным функционалом. Вот несколько причин, почему Telegram лучше всего подходит для нашего проекта [1]:

1. **Популярность среди молодежи**
   Многие школьники уже используют Telegram в повседневной жизни, поэтому им не нужно устанавливать дополнительное приложение. Это снижает порог входа и увеличивает вероятность, что бот действительно будет полезен.
2. **Доступность на всех платформах**
   Telegram работает на телефонах, планшетах, компьютерах и даже в браузере. Ученик может взаимодействовать с ботом в любом удобном месте — дома, в школе, в транспорте.
3. **Удобные инструменты для взаимодействия**
   - Бот может отправлять текстовые сообщения, картинки, файлы, ссылки.
   - Возможность создавать **кнопки и меню** упрощает навигацию.
   - Можно реализовать **интерактивные тесты и опросы**.
4. **Система уведомлений**
   Telegram поддерживает мгновенные уведомления. Это позволяет отправлять напоминания о домашних заданиях, предстоящих экзаменах и важных событиях.
5. **Безопасность и стабильность**
   Telegram обеспечивает высокий уровень защиты данных и надежную работу серверов.
6. **Гибкость и масштабируемость**
   Бот можно легко дополнять новыми функциями, не нарушая его работу.

Благодаря этим преимуществам Telegram стал идеальной платформой для EduVerse Bot.

Как можно разрабатывать боты для Telegram?

Существует несколько способов создания Telegram-ботов. Разработчики могут выбирать из различных языков программирования и инструментов в зависимости от сложности проекта.

1. Без программирования (конструкторы ботов)

Есть сервисы, которые позволяют создать простого бота без написания кода:

- Manybot
- Chatfuel
- Botmother

Однако такие решения подходят только для базовых задач (например, автоматических ответов), поэтому они не использовались при разработке EduVerse Bot.

2. С помощью программирования

Разработка бота с нуля дает больше возможностей. Для этого можно использовать разные языки программирования.

- **Python** (используется в EduVerse Bot) [2-6]
  - Один из самых популярных языков для создания ботов.
  - Поддерживает библиотеки **aiogram**, **Telebot**, **python-telegram-bot**.
  - Легко интегрируется с базами данных.
- **JavaScript (Node.js)**
  - Позволяет создавать быстрые боты, но требует больше ресурсов.
  - Используются библиотеки **Telegraf** и **grammY**.
- **Go, Java, PHP**
  - Используются в более сложных проектах, но реже применяются для чат-ботов.

EduVerse Bot написан на **Python с использованием библиотеки aiogram**. Это современный и удобный инструмент, который позволяет обрабатывать сообщения пользователей быстро и эффективно.

Архитектура бота и его модули

EduVerse Bot спроектирован так, чтобы можно было легко добавлять новые функции. В основе системы — **модульная архитектура**. Это значит, что бот состоит из отдельных частей (модулей), которые выполняют свою задачу.

Основные модули системы

1. **Модуль обработки команд**
   - Бот реагирует на команды.
   - Поддерживаются кнопки и интерактивные меню.
2. **Модуль управления пользователями**
   - База данных SQLAlchemy хранит информацию о каждом пользователе [7].
   - Ученик может видеть свой прогресс, статистику.
3. **Модуль обучения**
   - Подготовка к экзаменам (ОГЭ, ЕГЭ, ВПР).
   - Генерация тестов и кратких конспектов.
4. **Модуль статистики**
   - Фиксация успеваемости ученика.
   - Персональные рекомендации по учебе.
5. **Интерактивный модуль (чат с ИИ)**
   - Возможность задать вопрос по школьным предметам.
   - Ответы на основе искусственного интеллекта (Gemini API).

2.2. Этапы разработки

История разработки EduVerse Bot

Этап 1: Проектирование и создание базовой инфраструктуры

Концептуальное проектирование

- Разработана концепция образовательного бота, объединяющего различные инструменты для обучения.
- Выбрана платформа Telegram как наиболее доступная и популярная среди школьников.
- Спроектирована модульная архитектура, позволяющая постепенно наращивать функциональность.

Реализация базового функционала

- Создана система регистрации пользователей с разделением на роли (ученики, учителя, родители, гости).
- Разработана безопасная система хранения данных с учетом требований к защите персональных данных.
- Внедрена базовая система команд и навигации.
- Реализована поддержка работы с базой данных через SQLAlchemy.

Этап 2: Разработка образовательных модулей

Система подготовки к экзаменам

- Реализован модуль тестирования для подготовки к ОГЭ и ЕГЭ.
- Внедрена система автоматической проверки ответов.
- Добавлена возможность просмотра решений и пояснений к заданиям.
- Разработана адаптивная система навигации по заданиям.

Улучшение образовательного процесса

- Создана система работы с изображениями для визуализации задач.
- Добавлена возможность генерации вариантов тестов разной сложности.
- Реализована поддержка различных типов заданий (тесты, открытые вопросы, сопоставления).
- Разработана система хранения и структурирования учебного контента в формате JSON.

Этап 3: Внедрение аналитики и персонализации

Система анализа успеваемости

- Разработан модуль статистики для отслеживания прогресса учащихся.
- Внедрена система визуализации результатов обучения.
- Создана функциональность для анализа типичных ошибок.

Персонализация обучения

- Реализована система адаптивного подбора заданий в зависимости от успеваемости.
- Добавлена возможность формирования индивидуальной траектории обучения.
- Внедрена система рекомендаций на основе анализа статистики ответов.
- Разработан механизм сохранения истории ответов и динамики прогресса.

Этап 4: Интеграция искусственного интеллекта

Внедрение ИИ-ассистента [8]

- Интегрирован чат-бот на базе Gemini AI для помощи в обучении.
- Реализована система контекстных подсказок и объяснений.
- Добавлена возможность получения персонализированных рекомендаций.

Расширение функциональности

- Внедрена система оценки качества ответов ИИ.
- Добавлена возможность адаптации объяснений под уровень ученика.
- Реализована интеграция ИИ с системой анализа успеваемости.
- Расширены возможности диалога с ботом за счет интерактивных сценариев.

Результаты разработки

- Создан многофункциональный образовательный инструмент для школьников.
- Реализована комплексная система подготовки к экзаменам.
- Внедрены современные технологии искусственного интеллекта для персонализации обучения.
- Разработана система аналитики для отслеживания прогресса учащихся.
- Обеспечена масштабируемость и возможность дальнейшего развития.

Перспективы развития

- Расширение поддержки предметов и типов экзаменов.
- Внедрение системы групповой работы и соревновательных элементов.
- Развитие возможностей ИИ-ассистента с поддержкой голосового ввода.
- Интеграция с другими образовательными платформами и сервисами.

2.3. Особенности реализации ключевых функций

EduVerse Bot создан для помощи школьникам в учебе, подготовке к экзаменам и организации учебного процесса. Его главная цель – сделать обучение доступным, удобным и эффективным. Рассмотрим, как работают основные функции бота.

1. Регистрация пользователей и управление доступом

В **EduVerse Bot** предусмотрена система регистрации, которая позволяет каждому пользователю получать доступ к нужным функциям.

Как это работает:

- При первом запуске бот предлагает пройти **регистрацию**, где пользователь выбирает свою роль (ученик, учитель, родитель, гость).
- Учетная запись привязывается к **Telegram ID** – это позволяет заходить в бот с любого устройства без необходимости вводить логин и пароль.
- В зависимости от роли пользователи получают разные возможности:
    - **Ученики** могут проходить тесты, просматривать материалы и получать рекомендации.
    - **Учителя** (возможность в будущем) смогут проверять задания, загружать учебные материалы и давать советы.
    - **Родители** (возможность в будущем) смогут следить за успехами ребенка.
    - **Гости** могут попробовать некоторые функции в ознакомительном режиме.

Такая система делает бот **гибким** и удобным как для школьников, так и для учителей.

2. Подготовка к экзаменам (ОГЭ, ЕГЭ, ВПР)

Главная функция бота – помощь в подготовке к экзаменам. Он содержит задания разных типов и позволяет ученику проверять свои знания.

Как это работает:

- Ученику предлагаются **вопросы** из экзаменационных материалов.
- Ответы проверяются автоматически, и бот сразу показывает результат.
- В некоторых заданиях предусмотрены **пояснения и правильные решения**, чтобы ученик мог понять свою ошибку.
- Поддерживаются разные **типы вопросов**:
    - Выбор правильного ответа.
    - Ввод числа или текста.
    - Соответствия и другие форматы.
- Можно выбрать **сложность** заданий и решать их в удобном темпе.

Эта функция делает подготовку к экзаменам **структурированной** и **эффективной**.

3. Работа с изображениями и сложными заданиями

Некоторые экзаменационные вопросы требуют работы с картинками (например, **геометрические задачи** в математике).

Как это реализовано:

- Бот поддерживает **отправку изображений** вместе с заданиями.
- Ученик может рассмотреть чертежи, схемы или графики, не выходя из Telegram.
- В дальнейшем планируется добавить возможность **рисовать решения прямо в боте**.

Это делает учебный процесс удобнее, особенно при изучении **математики, физики и химии**.

4. Генерация шпаргалок и кратких конспектов

Для быстрого повторения материала бот может предоставлять **краткие конспекты** по школьным предметам.

Как это реализовано:

- В базе данных хранятся **структурированные материалы** по основным темам.
- Пользователь может выбрать **нужную тему**, и бот отправит **краткое объяснение**.
- Планируется добавить функцию **создания персонализированных шпаргалок**, которые будут учитывать ошибки ученика.

  Это ускоряет подготовку и помогает лучше запоминать материал.

В будущем планируется **добавление новых возможностей**, таких как интеграция с расписанием, расширенные образовательные материалы и поддержка дополнительных предметов.

2.4. Результаты разработки и тестирования

Разработка **EduVerse Bot** прошла несколько этапов, начиная с концептуального проектирования и заканчивая тестированием его ключевых функций. На каждом этапе проводились проверки, исправления ошибок и оптимизация работы, чтобы сделать бота удобным, надежным и полезным для пользователей.

1. Итоговая функциональность бота

В результате работы был создан **многофункциональный образовательный помощник**, который включает:

✓ **Систему регистрации и персонализации** – бот адаптируется под роль пользователя (ученик, учитель, родитель).

✓ **Модуль подготовки к экзаменам** – включает тестирование, автоматическую проверку ответов и пояснения.

✓ **Систему напоминаний** – помогает ученикам не забывать о важных событиях.

✓ **Гибкую архитектуру** – позволяет легко расширять функциональность.

Эти возможности делают бота **эффективным инструментом для подготовки к экзаменам и организации учебного процесса**.

2. Тестирование и оптимизация

Чтобы убедиться, что бот работает **стабильно и правильно**, было проведено тестирование на нескольких уровнях:

- Функциональное тестирование

- Проверены все основные команды, кнопки и навигация.

- Тестировалась работа с разными типами пользователей.
- Исправлены ошибки, связанные с обработкой команд.

- Тестирование удобства использования

- Изучено, насколько бот интуитивно понятен пользователям.
- Упрощены формулировки в сообщениях и улучшена навигация.

- Проверка производительности

- Оптимизирована скорость работы бота и базы данных.
- Минимизированы задержки при отправке сообщений и обработке запросов.

Тестирование проводилось с реальными пользователями, которые оставили обратную связь, что позволило внести полезные изменения.

- Основные улучшения после тестирования

В процессе тестирования были выявлены и исправлены **ключевые недочеты**:

- Улучшена система регистрации, чтобы пользователи быстрее начинали работу.
- Добавлены пояснения к сложным вопросам в тестах.
- Оптимизировано взаимодействие с базой данных, что ускорило работу бота.
- Улучшены ответы бота, чтобы они были более понятными.

Эти изменения сделали бота **более удобным и эффективным** для школьников.

4. Перспективы развития

Хотя **EduVerse Bot** уже работает, его возможности можно значительно расширить. В планах:

- Добавить новые предметы и задания.
- Улучшить систему статистики и анализа прогресса.
- Реализовать поддержку голосовых команд.
- Интегрировать бота с внешними образовательными ресурсами.

Таким образом, **EduVerse Bot** продолжит развиваться, становясь еще полезнее для учеников и учителей.

Заключение

В ходе данной работы был разработан мультиинструмент (бот) для школьников, предназначенный для повышения продуктивности в учебе и подготовки к экзаменам. Разработка велась с акцентом на создание функционального и удобного приложения, использующего современные технологии программирования и принципы проектирования пользовательского интерфейса.

Основными результатами работы являются:

• Разработана концепция и архитектура бота, обеспечивающие его масштабируемость и возможность дальнейшего развития.

• Реализованы ключевые функции: система профилей пользователей с разделением ролей, модуль подготовки к экзаменам с автоматической проверкой ответов и генерацией пояснений, а также конвертация математических формул (LaTeX).

• Интегрирован чат-бот на базе ИИ для помощи в обучении и предоставления контекстных подсказок.

• Внедрена система геймификации (статистика успеваемости, система достижений, счетчик регулярности занятий), направленная на поддержание учебной мотивации.

Процесс разработки включал несколько этапов: проектирование базовой инфраструктуры, создание образовательных модулей, внедрение системы аналитики и персонализации, а также интеграцию искусственного интеллекта. На каждом этапе проводилась проверка работоспособности ключевых функций и оптимизация кода.

В рамках работы было проведено внутреннее (альфа) тестирование функционала. Оценка работоспособности показала, что система успешно справляется с поставленными задачами: корректно обрабатывает запросы, сохраняет контекст диалога с ИИ и стабильно ведет учет статистики. Хотя массовое внедрение и сбор метрик на широкой аудитории оставлены на следующие этапы, текущая реализация полностью подтверждает жизнеспособность выбранных технологических и архитектурных решений.

Перспективы развития проекта: В дальнейшем проект обладает широким потенциалом для масштабирования за счет:

• Расширения базы заданий и добавления новых школьных предметов.

• Интеграции бота с внешними образовательными платформами и базами данных по API.

• Развития аналитического модуля для формирования более детальных индивидуальных траекторий обучения на основе типичных ошибок пользователя.

• Проведения бета-тестирования на фокус-группах школьников для глубокого анализа пользовательского опыта (UX).

Разработанный мультиинструмент (бот) представляет собой перспективное решение для цифровизации образования и может стать полезным помощником для школьников в учебе и подготовке к экзаменам. Дальнейшие исследования и усовершенствования позволят раскрыть его потенциал в полной мере и создать эффективный инструмент для повышения качества образования.

Список литературы:

1. Документация Telegram Bot API: URL: https://core.telegram.org/bots/api.
2. Документация aiogram: URL: https://docs.aiogram.dev/en/latest/.
3. Документация SQLAlchemy: URL: https://docs.sqlalchemy.org/en/latest/.
4. Алексей Яковенко. Telegram Боты на Aiogram 3.x: Первые Шаги. – 10 июня 2024 года // URL: https://habr.com/ru/companies/amvera/articles/820527/.
5. Hemaks. Создание Telegram-ботов с помощью Python и Aiogram: подробное руководство. / Hemaks // Hemaks: Expert Tutorials & Code Resources. – 15 ноября 2023 года // URL: https://hemaks.org/ru/posts/building-telegram-bots-with-python-and-aiogram-a-comprehensive-guide/.
6. SkyPro. Создание ботов на Python с использованием aiogram. / SkyPro // SkyPro Wiki. – 10 декабря 2023 года // URL: https://sky.pro/wiki/python/sozdanie-botov-na-python-s-ispolzovaniem-aiogram/.
7. Википедия – свободная энциклопедия // URL: https://ru.wikipedia.org/
8. Толковый словарь терминов по искусственному интеллекту. / Под ред. В. И. Левина // Москва: Издательство «Наука», 2020. – 150 с.

БОТ PERSONAL ASSISTANT – ПОМОЩНИК, В КАРМАНЕ (ПЕРСОНАЛЬНЫЕ АССИСТЕНТЫ И ЧАТ-БОТЫ: АНАЛИЗ КАЧЕСТВА, ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ)

Юдаков. А.А., Побожьев С.К.

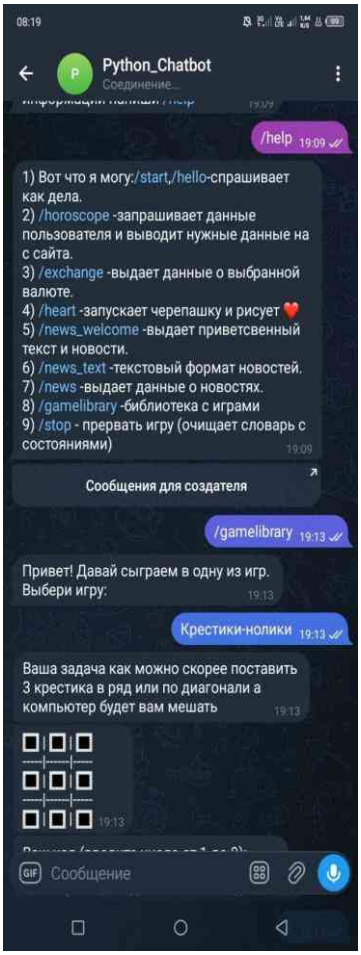
МОУ «Лицей», с.Ельники

Введение

В современном мире цифровые технологии становятся неотъемлемой частью жизни как отдельных людей, так и организаций. Персональные ассистенты и чат-боты — это инструменты, способные существенно упростить коммуникацию, автоматизировать рутинные задачи и предоставить новые возможности для развлечения и саморазвития. Однако разнообразие подобных решений на рынке порождает ряд проблем: отсутствие единых стандартов оценки качества, сложности в выборе оптимального продукта, недоверие к технологиям и замедление их внедрения в бизнес-процессы.

1. Сбор данных и создание собственной версии персонального ассистента

На первом этапе исследования был проведён анализ существующих решений на рынке: изучены популярные чат-боты и виртуальные ассистенты, их функциональные возможности, сценарии использования и отзывы пользователей. На основе полученных данных разработана архитектура собственного персонального ассистента, реализующего базовые функции: обработка текстовых запросов, предоставление справочной информации, поддержка диалога и выполнение простых команд. На рисунке 1 представлено основное меню и библиотека игр.



2. Проведение тестов и сравнение преимуществ и недостатков

Для оценки эффективности созданного ассистента был проведён ряд тестов:

- **Анализ скорости и точности ответов** на типовые запросы.
- **Оценка удобства интерфейса** и интуитивности взаимодействия.
- **Сравнение с аналогами** по ключевым параметрам: функциональность, надёжность, адаптивность к разным сценариям.

В ходе тестирования выявлены как сильные стороны (высокая скорость отклика, гибкость настройки), так и недостатки (ограниченная база знаний, сложности с обработкой сложных или нестандартных запросов).

3. Формирование выводов и предложений по совершенствованию

По результатам исследования сформулированы следующие выводы:

- Необходима разработка единых критериев оценки качества диалоговых агентов.
- Для повышения доверия пользователей важно обеспечить прозрачность алгоритмов и возможность обратной связи.
- Рекомендуется регулярное обновление базы знаний и внедрение механизмов машинного обучения для повышения адаптивности ассистентов.

Рис. 1-*интерфейс чат-бота*

Заключение

Проведённое исследование показало, что, несмотря на широкое распространение чат-ботов и персональных ассистентов, рынок нуждается в стандартизации и объективных методах оценки их качества. Создание собственного ассистента позволило выявить ключевые проблемы и предложить пути их решения, что способствует развитию цифровых помощников и их более эффективному внедрению в повседневную жизнь и бизнес-процессы.

Список литературы:

1. Матвеева Н. Ю., Золотарюк А. В. Технологии создания и применения чат-ботов // Научные записки молодых исследователей. — 2018. — № 1. — С. 28–30. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-sozdaniya-i-primeneniya-chat-botov/viewer
2. Макарушкина Н. А. «Современные каналы распространения новостей: чат-бот в Telegram и ВКонтакте». Статья опубликована в журнале «Форум молодых учёных» в 2020 году, номер 2 (42), страницы 174–177. URL:https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/123540/1/978-5-7996-3653-1_2023_031.pdf
3. Шумилина М. А., Коробко А. В. «Разработка чат-бота на языке программирования Python в мессенджере Telegram». Статья опубликована в журнале «Научные известия» в 2022 году, номер 28, страницы 47–55. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-chat-bota-na-yazyke-programmirovaniya-python-v-messendzhere-telegram/viewer

Секция «Математические методы в экономике и социологии»

НЕЙРОБИОЛОГИЯ МАРКЕТИНГА: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ МОЗГА НА ЦЕНУ, БРЕНД И ВИЗУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН

Тенишева А.С. , Бродская Е.А.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Современные маркетинговые исследования сталкиваются с фундаментальным ограничением: традиционные инструменты, такие как опросы и фокус-группы, фиксируют лишь ту часть потребительского опыта, которая поддается осознанной рефлексии. Согласно оценкам Н.П. Кетовой и И.Ю. Грановской, эта часть не превышает 15% от общего объема когнитивной активности, сопровождающей процесс принятия решения о покупке. Остальные 85% процессов протекают на бессознательном уровне, создавая значительный разрыв между декларациями и реальным поведением. Нейромаркетинг, формирующийся на стыке экономической психологии, нейробиологии и прикладной математики, предлагает инструментарий для объективной количественной оценки именно этих неосознаваемых компонентов реакции на маркетинговые стимулы. Ключевое преимущество подхода заключается в регистрации имплицитных реакций, возникающих на порядок быстрее, чем формируется вербализованная оценка.

Современная нейромаркетинговая методология включает комплекс технологий. Электроэнцефалография обладает высоким временным разрешением, позволяя отслеживать динамику внимания и эмоциональной валентности. Функциональная магнитно-резонансная томография обеспечивает высокое пространственное разрешение, визуализируя глубокие структуры, связанные с доверием к бренду и формированием субъективной ценности. Айтрекинг регистрирует траектории движения глаз, предоставляя данные о визуальном внимании к элементам дизайна [5]. Теоретической рамкой, объединяющей эти данные, выступает теория предсказательного кодирования и концепция «байесовского мозга». Согласно этой модели, мозг функционирует как иерархическая предсказательная система, минимизирующая ошибку предсказания [3]. Применительно к нейромаркетингу это формализует взаимодействие между априорными ожиданиями потребителя, сформированными брендом или ценой, и поступающей сенсорной информацией. Результирующая оценка стимула описывается байесовским соотношением, в котором итоговая вероятность гипотезы пропорциональна произведению степени соответствия сенсорных данных данной гипотезе и априорной вероятности гипотезы. Эта модель объясняет ценовой плацебо-эффект, когда высокая цена активирует ожидание качества, модулируя нейрональный ответ в вентромедиальной префронтальной коре. Как показано в работах В.А. Ключарева, А. Шмидса и А.Н. Шестаковой принятие решений обусловлено взаимодействием когнитивных нейрональных систем, локализованных в дорсолатеральной префронтальной коре, и эмоциональных нейрональных систем, связанных с островковой корой и миндалевидным телом, причем конфликт между этими системами лежит в основе иррациональной приверженности брендам [4].

Современные нейроэкономические исследования позволяют выделить специфические паттерны мозговой активности, связанные с обработкой трёх ключевых маркетинговых стимулов: цены, бренда и визуального дизайна. Каждый из этих стимулов активирует различные, но взаимосвязанные нейрональные системы, что создаёт основу для математического моделирования интегративного потребительского решения.

Цена как маркетинговый стимул обрабатывается в системе, связывающей восприятие боли и субъективной ценности. Исследования с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии показали, что слишком высокая цена активирует островковую кору, которая традиционно ассоциируется с ощущением физической боли и неприятия. Эта активация тем сильнее, чем выше цена относительно субъективного порога приемлемости. Одновременно с этим ожидаемая польза от продукта обрабатывается в прилежащем ядре — центральной структуре системы вознаграждения. Итоговое решение о покупке представляет собой результат нейронального взвешивания сигналов боли и вознаграждения. При этом дорогой бренд может смещать этот баланс в сторону системы вознаграждения: когда потребители пьют вино, которое им сообщают как дорогостоящее, хотя на самом деле оно не отличается от дешёвого, активация в вентромедиальной префронтальной коре и орбитофронтальной коре возрастает, а субъективное удовольствие увеличивается, несмотря на

идентичность сенсорного опыта. Это явление, известное как ценовой плацебо-эффект, напрямую корреспондирует с эффектом влияния бренда на сенсорное восприятие, выявленным в нашем исследовании. С точки зрения байесовского моделирования, цена выступает как сильный априорный сигнал, где высокая цена увеличивает априорную вероятность высокого качества, что, в свою очередь, повышает итоговую апостериорную оценку продукта, даже если объективные сенсорные данные противоречат этому ожиданию.

Бренд представляет собой сложный ассоциативный конструкт, аккумулирующий предыдущий опыт, эмоциональные связи и социокультурные ассоциации. Нейронально бренд обрабатывается на нескольких уровнях. Узнавание бренда активирует височные доли, связанные с семантической памятью. Однако ключевым для понимания эффекта бренда является его способность активировать систему вознаграждения. Бренд не просто вызывает положительную эмоцию, но и активирует нейрональные механизмы самоидентификации и культурной памяти, что делает его устойчивым к объективным сенсорным данным. В контексте байесовской модели, бренд можно рассматривать как априорное распределение, сформированное всей историей взаимодействия потребителя с продуктом. Это распределение имеет высокую уверенность, поэтому даже при несоответствии сенсорных данных апостериорная оценка остаётся смещённой в сторону брендового ожидания. В рамках байесовской модели это означает, что ожидание высокого качества, сформированное брендом, оказывает более сильное влияние на итоговую оценку, чем собственно вкусовые и визуальные характеристики продукта. Именно этим объясняется выявленный в нашем исследовании эффект: физически идентичный батончик воспринимался как более вкусный, когда был ассоциирован с брендом БэйбиФокс.

Визуальный дизайн, включая упаковку, цветовую гамму и композицию, обрабатывается в первую очередь зрительной корой, но его влияние распространяется на эмоциональные и когнитивные системы значительно быстрее, чем формируется осознанное восприятие. Первые фиксации взгляда происходят в течение 100 – 300 миллисекунд после предъявления стимула [5]. Цвет как элемент дизайна имеет собственные нейрональные корреляты. Синий цвет, доминирующий в упаковке исследуемого бренда, как показано в нейроэкономических исследованиях, активирует префронтальную кору — область, отвечающую за оценку надёжности и когнитивный контроль, а также снижает активность миндалевидного тела, связанного с тревогой. Одновременно синий цвет вовлекает мезолимбическую систему вознаграждения формируя положительные ассоциации. В контексте принятия решений синий цвет может усиливать доверие к качеству, привлекательности, уверенности в продукте, что усиливает априорное ожидание качества. С математической точки зрения, визуальный дизайн можно моделировать как функцию предобработки сенсорного сигнала. Он не только определяет, какие сенсорные данные попадут в систему обработки через направление взгляда и селекцию внимания, но и модулирует доверие к этим данным в иерархической байесовской модели.

Цена, бренд и дизайн не обрабатываются изолированно. Они сходятся в общей нейрональной сети, где ключевую роль играет вентромедиальная префронтальная кора. Согласно модели субъективной ценности, эта область интегрирует сигналы от разных модальностей и формирует единую шкалу субъективной полезности. Когда цена высока, но бренд силён, вентромедиальная префронтальная кора может перевесить сигнал боли из островковой коры, что приводит к решению о покупке. Когда дизайн привлекателен, он повышает ожидание удовольствия, что также отражается в повышенной активации этой области. Для математического моделирования этого интегративного процесса могут быть использованы иерархические байесовские модели, в которых цена, бренд и дизайн выступают как независимые предикторы, но их взаимодействие моделируется через общий параметр субъективной ценности.

Изложенные нейробиологические механизмы обработки бренда, цены и визуального дизайна послужили теоретической основой для проведения собственного эмпирического исследования.

Для эмпирической проверки этих положений проведено исследование влияния известного бренда на восприятие продукта. Выбор бренда обусловлен его высокой узнаваемостью среди студенческой аудитории, а также тем, что шоколадные батончики относятся к категории импульсных покупок, где эмоциональная составляющая играет особенно важную роль. В исследовании приняли участие 32 студента, из них 18 женщин и 14 мужчин, в возрасте от 18 до 25 лет, средний возраст составил 20,2 года (Q = 1,6). Все респонденты

являются студентами очной формы обучения вузов города Саров. Набор осуществлялся методом удобной выборки, участие было добровольным и анонимным. Используя схему с повторными измерениями, каждый испытуемый оценивал два физически идентичных образца шоколадного батончика: первый — в оригинальной упаковке бело-голубым дизайном и логотипом, второй — извлеченный из оригинальной упаковки и помещенный на тарелку без какой-либо маркировки. Порядок предъявления стимулов балансировался: половина испытуемых начинала с брендированного образца, половина — с анонимного, что позволило нивелировать эффект порядка и усталости. Между дегустациями предусматривался перерыв с полосканием рта водой для очищения рецепторов.

Оценка восприятия проводилась по методике семантического дифференциала, включающей десять биполярных шкал с семибалльной градацией: качественный – некачественный, дорогой – дешёвый, вкусный – невкусный, надёжный – ненадёжный, престижный – непрестижный, желаемый – нежелаемый, современный – устаревший, уникальный – обычный, привлекательность упаковки – непривлекательность упаковки, высокого качества – низкого качества. Порядок шкал и расположение полюсов рандомизировались в разных анкетах для снижения эффекта установки. После заполнения анкет проводился контрольный опрос, включавший вопросы об узнаваемости бренда, уровне лояльности к нему по пятибалльной шкале и частоте покупок продукции бренда за последние три месяца.

Результаты контрольного опроса показали, что бренд узнали все 32 участника (100%), средний уровень лояльности составил 3,8 балла из 5 (Q = 0,9), а 24 человека (75%) сообщили о покупке продукции бренда за последние три месяца, что подтверждает актуальность выбранного бренда для целевой аудитории. Результаты дегустации подтвердили гипотезу: присутствие известного бренда значимо повысило восприятие продукта по большинству характеристик. Наибольший разрыв зафиксирован по шкале привлекательности упаковки, разность составила 2,53 балла, а d Коэна — 1,63, что отражает силу визуального воздействия оригинального дизайна. Высокие различия также наблюдались по шкалам качественный (2,06, d = 1,44), высокого качества (2,13, d = 1,50), престижный (2,13, d = 1,34) и желаемый (2,13, d = 1,36). Особенно показателен результат по шкале вкусный (разность 1,38, d = 1,00): физически идентичный продукт воспринимался как более вкусный, будучи ассоциированным с брендом. Этот феномен — эффект влияния бренда на сенсорное восприятие — напрямую соответствует данным нейроэкономических исследований об активации системы при восприятии известного бренда [6]. Единственной шкалой, по которой не выявлено значимых различий ($p = 0,064$), оказалась уникальный – обычный, что объясняется массовым позиционированием бренда, который воспринимается потребителями как надежный и доступный, но не как эксклюзивный. Корреляционный анализ по методу Пирсона выявил сильную положительную связь между уровнем лояльности к бренду и оценками престижный ($r = 0,74$, $p < 0,001$) и качественный ($r = 0,71$, $p < 0,001$), а также умеренную связь с оценкой вкусный ($r = 0,52$, $p = 0,002$), подтверждая, что эмоциональная привязанность усиливает влияние бренда на восприятие, включая сенсорные характеристики.

Таким образом, полученные результаты интерпретируются в контексте байесовской модели: бренд выступает как априорное ожидание, модулирующее обработку сенсорного сигнала. Размер эффекта (d Коэна от 0,97 до 1,63) оценивается как большой, что свидетельствует о высокой практической значимости влияния бренда на восприятие даже при относительно небольшой выборке. Нейробиология маркетинга, опираясь на математическое моделирование нелинейных взаимодействий когнитивных и эмоциональных нейрональных систем, позволяет не только объяснить иррациональность потребительского выбора, но и предоставляет инструментарий для количественного прогнозирования эффективности маркетинговых стимулов — цены, бренда и визуального дизайна.

Список литературы:

1. Богомолова Т.А. Методологические основы анализа эмоциональных аспектов потребительского поведения // Дискуссия. 2025. № 7 (140). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-osnovy-analiza-emotsionalnyh-aspektov-potrebitelskogo-povedeniya (дата обращения: 10.03.2026).
2. Кетова Н.П., Грановская И.Ю. Возможности реализации нейромаркетинга для активизации продвижения товаров и услуг потребителям // Креативная экономика. 2020. № 1.

URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-realizatsii-neyromarketinga-dlya-aktivizatsii-prodvizheniya-tovarov-i-uslug-potrebitelyam (дата обращения: 10.03.2026).
3. Ключарев В.А., Шмидс А., Шестакова А.Н. Нейроэкономика: нейробиология принятия решений // Экспериментальная психология. 2011. Т. 4. № 2. С. 14–35. URL: https://psyjournals.ru/journals/exppsy/archive/2011_n2/exppsy_2011_n2_41980.pdf (дата обращения: 31.03.2026).
4. Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики: хаос, структуры, вычислительный эксперимент. М.: Либроком, 2009. 312 с.
5. Прядко С.Н. Нейромаркетинговые исследования. 2025. URL: http://dspace.bsuedu.ru/bitstream/123456789/65452/1/Pryadko_Neyromarketingovye_25.pdf (дата обращения: 10.03.2026).
6. Шувалов В.А., Черниговская Т.В. (ред.) Нейронаука: проблемы и перспективы. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2018. URL: https://nemoai.narod.ru/Library/Chernigovskaya.pdf (дата обращения: 10.03.2026).

СТРАТЕГИЧЕСКАЯ ОРИЕНТАЦИЯ РОССИЙСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ: МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РАЗВИТИЕМ

Виноградов Н.В.
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина», г. Нижний Новгород

Российская промышленность по итогам последних лет завершила реактивный этап адаптации к новым геоэкономическим условиям и вступила в фазу осознанной, планомерной цифровой трансформации. Если ранее движущей силой выступало внешнее регуляторное и санкционное давление, вынуждавшее к экстренному импортозамещению, то сегодня формируется внутренний стратегический вектор, нацеленный на построение технологического суверенитета и создание полноценных цифровых экосистем [5]. Переход к комплексным программным внедрениям является значимым, однако он отражает глубокие структурные барьеры и системные противоречия, которые требуют принципиально нового управленческого подхода. В этой связи ключевым вызовом становится не столько доступность самих цифровых инструментов, сколько отсутствие целостной методологии, способной связать стратегические отраслевые цели с конкретными технологическими решениями преодолевая организационную и корпоративную инерцию. Таким образом, актуальность поставленной в работе задачи заключается в исследовании диалектики между достигнутым технологическим прогрессом, сохраняющимися ограничениями и необходимостью разработки адаптивной управленческой рамки, которая трансформирует цифровизацию из набора проектов в источники устойчивого конкурентного преимущества промышленного комплекса России [1].

Ситуацию на современном этапе можно охарактеризовать как популяризованную, с очевидными успехами в одних сегментах и сохраняющимся отставанием в других. Драйвером изменений выступил курс на импортозамещение, поддержанный государственным финансированием, направленным исключительно на отечественные решения. В критически важных отраслях – оборонно-промышленном комплексе, энергетике, металлургии – доля российского программного обеспечения демонстрирует стремительный рост, что в свою очередь сопровождается активным внедрением ключевых промышленных систем [2]. Одновременно происходит важная организационная трансформация: свыше 80% российских компаний уже сформировали специализированные команды для цифровизации, что свидетельствует о переходе восприятия цифровизации как вспомогательной функции к ее признанию ключевым стратегическим направлением. В этой связи возникают новые управленческие роли, к основным задач которых относится фокус на повышении эффективности процессов, адаптивности бизнеса и сокращения затрат. На сегодняшний день рынок демонстрирует созревание: консолидируются разрозненные проекты в единые стратегии, наблюдается рост отраслевых экосистем и переход к платформенным архитектурам. Однако протекающий прогресс неоднороден. Предприятия со сложными, исторически наслоившимися ИТ-ландшафтами сталкиваются с проблемой затяжной адаптации, в то время как компании с простой производственной моделью адаптируются быстрее. Более того, сохраняется фундаментальная инфраструктурная проблема: незрелость отечественного

оборудования, в частности серверов и сетевого железа, которые по производительности и надежности не всегда способны полноценно заменить зарубежные аналоги [3].

За видимыми успехами обуславливается комплекс взаимосвязанных структурных барьеров, замедляющих стадию от цифровизации к полномасштабной цифровой трансформации. Данные барьеры носят не только технологический, но и управленческий, кадровый и социокультурный характер. Во-первых, это методологический и стратегический вакуум. Как отмечают эксперты, отечественные предприятия часто сталкиваются с разрозненностью и несогласованностью представлений о сущности цифровых технологий, возможностях применения и управления ими [4]. Цифровизация часто реализуется как набор точечных, непоследовательных инициатив, а не как целостная программа, перестраивающая бизнес-модель и все элементы управления. Отсутствие четкой дорожной карты и измеримых бизнес-целей для цифровой трансформации является критическим препятствием. Во-вторых, особо ощутимой проблемой остаётся дефицит кадровых компетенций и сопротивление изменениям. Нехватка квалифицированных специалистов, способных работать с передовыми отечественными системами (MES, PLM, системами предиктивной аналитики), сочетается с консерватизмом значительной части персонала, утвердившего традиционные методы работы. В-третьих, отчетливо преследуется барьер цифровой культуры. Цифровая трансформация невозможна без соответствующей организационной культуры, которая включает принятие решений на основе данных, продуктивный подход к разработке решений и управление изменениями как традиционную практику. В-четвертых, сохраняются экономические и инфраструктурные ограничения. Высокая ключевая ставка и налоговая политика создают финансовое давление, особенно для малого и среднего бизнеса.

Для преодоления имеющихся барьеров особенно важная гибкая, адаптивная методология управления цифровой трансформацией. Ключевая цель данной модели – создать непрерывный и управляемый процесс, в котором стратегические цели промышленной отрасти (технологический суверенитет, эффективность, рост экспорта высокотехнологичной продукции) последовательно транслируются в конкретные цифровые проекты. Ядром такой методологии является циклическая модель, состоящая из нескольких взаимосвязанных этапов. Первый этап – стратегическое позиционирование и диагностика. Он начинается с четкого определения бизнес-целей цифровой трансформации, будь то сокращение операционных затрат, увеличение производительности оборудования или сокращение времени вывода нового продукта на рынок. Параллельно проводится всесторонняя диагностика цифровой зрелости предприятия, оценивающая текущее состояние ИТ-инфраструктуры, данных, процессов и компетенций, что в свою очередь позволяет выявить «узкие места» и сформировать реалистичное целевое состояние. Второй этап – архитектурное проектирование и выбор вектора развития. На основе анализа разрабатывается целевая архитектура цифрового предприятия, определяющая, как различные системы (ERP, MES, PLM, и др.) будут интегрированы. Ключевым решением здесь является выбор адаптивного вектора внедрения: «сверху вниз» (от корпоративной стратегии и интеграции данных к автоматизации цехов) для сложных, стратегически важных преобразований или «снизу-вверх» (от пилотного проекта на конкретном участке к масштабированию) для быстрого получения измеримого эффекта и формирования позитивного опыта у сотрудников. Третий, центральный этап – итеративная разработка и внедрение. На данном этапе применяется подход, предполагающий работу короткими циклами (спринтами). Формируются кросс-функциональные команды, включающие как ИТ-специалистов, так и представителей бизнес-подразделений. Решения разрабатываются в формате минимально жизнеспособного продукта (MVP), который тестируется, оценивается на предмет достижения бизнес-целей и в последующем дорабатывается. Данный подход позволяет минимизировать риски крупных капиталовложений, оперативно реагировать на изменения и вовлекать конечных пользователей в процесс создания решения. Завершающий, четвертый этап – эксплуатация, масштабирование и непрерывное совершенствование. Успешные пилотные проекты масштабируются на другие подразделения или процессы. Внедряются практики непрерывного мониторинга и анализа данных для оценки эффективности и выявления новых точек роста. Важнейшей составляющей данного этапа является управление изменениями и целенаправленное формирование цифровой культуры через обучение, пересмотр систем мотивации и продвижение новых ценностей.

Результатом проведенного исследования и синтеза анализа состояния, барьеров и предложенной методологии должна стать целостная методологическая рамка для стратегической ориентации промышленности на цифровые модели. Методологическая рамка –

это не инструкция, а структурированная система принципов, концепций, ролей, процессов и критериев оценки, которая задает логику, язык и последовательность действий по управлению цифровой трансформацией на отраслевом и корпоративном уровне. Она представляет собой концептуальный каркас, который может и должен адаптироваться под специфику конкретного предприятия, сохраняя при этом общую структуру и целеполагание.

Список литературы:

1. Календжян С.О. Направления развития инновационного потенциала предприятий промышленного комплекса / С. О. Календжян, М. А. Коркин // Управление. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 5-13. – DOI 10.26425/2309-3633-2024-12-3-5-13.
2. Карта российского рынка программного обеспечения 2025. – Электронные данные. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%9A%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0_%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BA%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_2025 (дата обращения 30.12.2025). – Текст: электронный.
3. Краковская И. Н. Цифровая зрелость промышленных предприятий: опыт оценки / И. Н. Краковская, Ю. В. Корокошко, Ю. Ю. Слушкина // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2024. – Т. 40, № 3. – С. 433-459. – DOI 10.21638/spbu05.2024.305.
4. Мельников А. С. Барьеры распространения цифровых технологий в деятельности российских компаний: причины и последствия / А. С. Мельников, Е. Г. Калабина // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. – 2024. – Т. 21, № 6(138). – С. 33-45. – DOI 10.2168/2413-2829-2024-6-33-45. – EDN RCPGFI.
5. Полянская В. А. Цифровая экономика: ключевые тренды для промышленных предприятий: монография / В. А. Полянская, В. П. Кузнецов. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 2025. – 108 с. – ISBN 978-5-85219-992-8.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА РФ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ГЛОБАЛЬНЫМ ВЫЗОВАМ

Кузнецова С.Н.
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина», г. Нижний Новгород

Введение

В условиях санкционного давления, разрыва глобальных цепочек создания стоимости и борьбы за технологическое лидерство обеспечение технологического суверенитета стало ключевым вопросом национальной безопасности РФ. Промышленные парки (ПП), как точки роста и концентрации высокотехнологичных производств, играют в этом процессе системообразующую роль [1]. Однако их развитие в новой парадигме сталкивается с комплексными вызовами: необходимость импортозамещения, оптимизация ресурсов, системный риск-менеджмент, дефицит обоснованных управленческих решений.

Использование математико-экономического аппарата для управления и оценки эффективности ПП позволит существенно повысить их вклад в обеспечение технологического суверенитета РФ.

Целью исследования является разработка методического подхода и практического инструментария на основе математико-экономических методов для повышения эффективности функционирования ПП как ключевых элементов обеспечения технологического суверенитета РФ.

Задачами исследования является:

— анализ существующих математико-экономических методов и моделей, применимых для управления ПП и оценке их эффективности;

— разработка системы критериев и показателей эффективности ПП, ориентированных на цели технологического суверенитета (например, коэффициент локализации, индекс технологической связанности резидентов, показатель устойчивости к санкционным рискам);

— построение экономико-математической модели для оптимизации отбора резидентов в ПП с целью формирования синергетических технологических цепочек, оценки рисков разрыва критически важных поставок и моделирования сценариев их замещения, расчета эффективности государственной поддержки с учетом мультипликативного эффекта на смежные отрасли;

— апробация разработанной модели в рамках «ИнноКластера».

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии экономико-математического моделирования применительно к задачам национальной технологической безопасности и суверенитета. Исследование способствует интеграции подходов в единый аналитический инструментарий, расширяя теоретические представления о механизмах адаптации национальной инновационной системы к глобальным дисбалансам.

Практическая значимость состоит в создании инструментария для количественной оценки: зависимости российской экономики от импорта критических технологий; эффективности различных механизмов импортозамещения; последствий возможных внешних ограничений; приоритетов при распределении ресурсов в рамках государственных программ технологического развития.

Основной текст

Анализ существующего математико-экономического инструментария для управления ПП выявляет его значительный, но фрагментированный потенциал. Ключевые применяемые методы включают:

— методы оптимизации (линейное и нелинейное программирование) для решения задач размещения резидентов, распределения ресурсов и управления земельными участками;

— модели теории игр для анализа кооперационных стратегий между резидентами (симбиоз, создание замкнутых цепочек добавленной стоимости) и управления конкуренцией;

— сетевой анализ для проектирования и оценки устойчивости инфраструктурных сетей ПП;

— стохастическое моделирование и метод Монте-Карло для оценки рисков (срывы поставок, колебания спроса) и анализа «узких мест»;

— экономико-математическое моделирование (модели «затраты-выпуск», производственные функции) для комплексной оценки мультипликативного экономического эффекта, производительности кластера и его вклада в региональное развитие.

Эффективность этих моделей существенно возрастает при их интеграции в системы поддержки принятия решений (DSS), использующие данные мониторинга в реальном времени, что позволяет перейти от статичного планирования к динамическому управлению и сценарному прогнозированию, максимизируя синергетический эффект ПП.

Для оценки эффективности ПП необходима система критериев и показателей, выходящая за рамки традиционной финансовой и операционной эффективности [2].

Ключевыми критериями и показателями становятся:

— критерий технологической устойчивости, измеряемый через глубину локализации критических компонентов, долю продукции, выпускаемой на отечественном оборудовании и ПО, и уровень технологической независимости в приоритетных сквозных технологиях;

— критерий инновационной связности и кооперации, оцениваемый через количество совместных НИОКР с научными и образовательными организациями, плотность производственно-технологической кооперации между резидентами (включая создание симбиозных цепочек и импортозамещающих контуров), а также объем выпуска высокотехнологичной продукции с высокой добавленной стоимостью;

— критерий кадрового и инфраструктурного суверенитета, включающий показатель обеспеченности инженерно-техническими кадрами, в том числе подготовленными по целевым программам, степень использования отечественных цифровых платформ для управления парком (цифровой двойник, IoT) и уровень безопасности критической инфраструктуры.

Интегральным индикатором эффективности выступает способность ПП выступать устойчивым узлом национальной технологической системы, минимизируя уязвимости от внешних шоков и обеспечивая воспроизводство критических компетенций и продуктов.

Экономико-математическая модель (рис.1) строится как задача многокритериальной оптимизации (целевая функция – максимизация совокупного синергетического эффекта и

мультипликатора для экономики региона, страны при минимизации совокупных рисков и бюджетных затрат) с сетевым представлением технологических цепочек ПП. Основу составляет ориентированный взвешенный граф, где вершины – предприятия-кандидаты, а дуги отображают потенциальные материальные, финансовые и информационные потоки между ними. Для каждого кандидата задается вектор атрибутов, включающий: производственный профиль, уровень технологической зависимости от импорта по критическим позициям, потенциал кооперации, потребность в субсидиях, налоговых льготах.

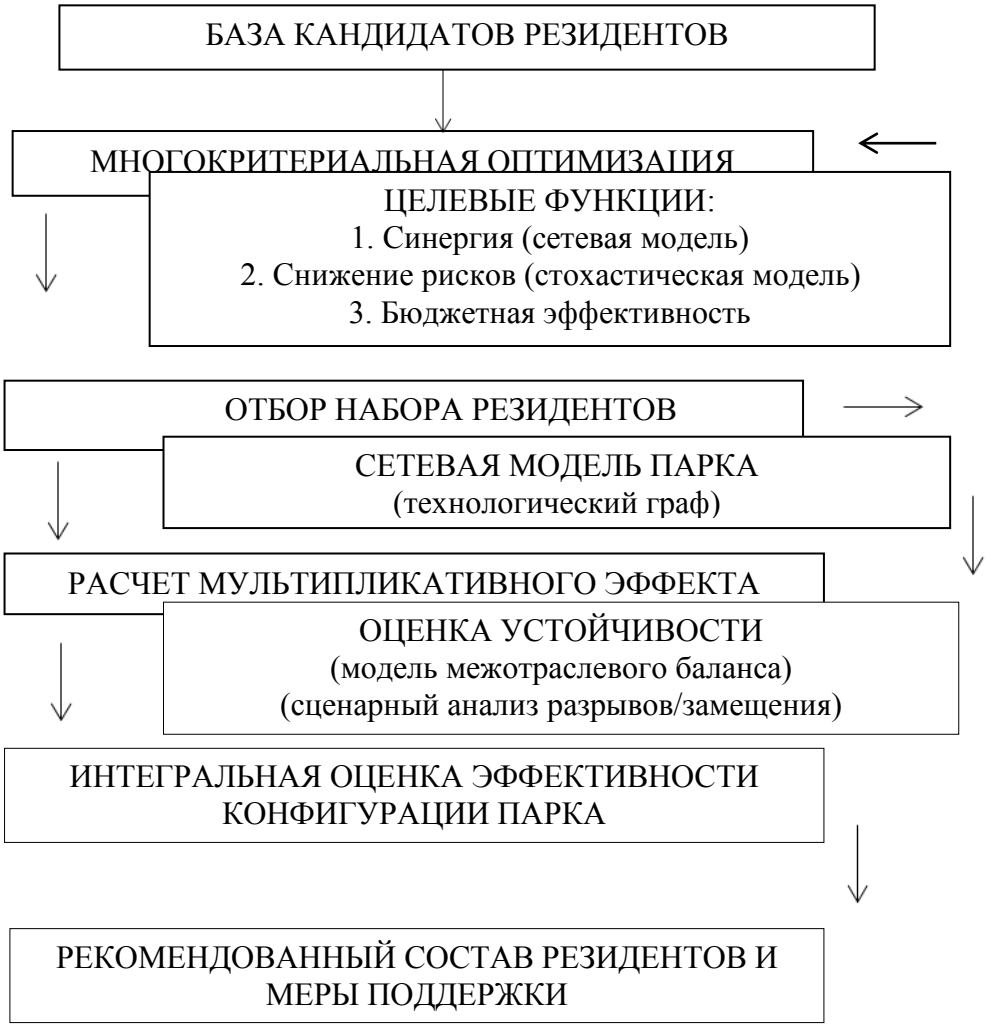


Рис. 1. Экономико-математическая модель ПП. Составлено автором в рамках проведенного исследования

Синергетический эффект формализуется через функцию, оценивающую сокращение логистических издержек, рост добавленной стоимости за счет создания промежуточных продуктов внутри ПП и эффект масштаба. Риски разрыва поставок моделируются с помощью методов теории надежности сетей и стохастического программирования с введением вероятностных характеристик сбоев для каждой дуги графа (поставки извне). Моделирование замещения осуществляется через вариацию структуры графа (добавление новых вершин-резидентов или перенаправление потоков) и расчет альтернативных издержек.

Эффективность господдержки оценивается через динамическую модель межотраслевого баланса (модель «затраты-выпуск»), куда в качестве экзогенного воздействия вводятся инвестиции и операционная деятельность отобранного пула резидентов, что позволяет рассчитать мультипликативный эффект на смежных отраслях и в бюджетной сфере.

Апробация разработанной экономико-математической модели была проведена на примере технопарка «ИнноКластер», где в качестве входных данных использовались реальные параметры 35 компаний-кандидатов из сферы микроэлектроники, робототехники и промышленного ПО, а также данные о существующих и потенциальных кооперационных связях между ними. Модель позволила сформировать оптимальный пул из 18 резидентов, который максимизировал замкнутость критической цепочки по производству сенсорных систем (снижение внешней зависимости по 7 ключевым компонентам на 45% в сравнении с базовым сценарием) и обеспечил синергетический эффект за счет локализации трех звеньев производственного цикла внутри кластера.

Сценарный анализ выявил два наиболее уязвимых узла поставок, для которых были рассчитаны, экономически обоснованы три альтернативных варианта замещения с привлечением резидентов-смежников. Интеграция результатов в региональную модель межотраслевого баланса показала, что выбранная конфигурация при запланированном объеме государственной поддержки генерирует мультипликативный эффект в 2,3 единицы на сопряженные отрасли и обеспечивает окупаемость бюджетных инвестиций за счет налоговых поступлений на горизонте 7 лет, подтверждая практическую применимость модели для задач технологического суверенитета.

В исследовании представлен авторский новый класс экономико-математических моделей, ориентированных на решение задач национально-стратегического планирования на микро- (парк) и мезо- (отрасль, регион) уровне. Данный инструмент необходим для обоснованного принятия решений о предоставлении господдержки, оценке эффективности реализуемой политики и стратегическом планировании размещения новых ПП. Конкретный программный инструмент важен для оптимизации загрузки ПП, формирования пула резидентов, усиления кооперации между ними и управления рисками.

Заключение

Результатом внедрения является повышение коэффициента полезного действия ПП как драйверов технологического суверенитета, выраженное в ускоренном импортозамещении, росте несырьевого экспорта и создании устойчивой к внешним шокам промышленной экосистемы.

Проведенное исследование демонстрирует, что обеспечение технологического суверенитета представляет собой многокритериальную задачу стратегического выбора в условиях неопределенности и ограниченных ресурсов. Применение математико-экономического аппарата позволяет перейти к количественному анализу альтернатив, выявлению «узких мест» и оценке результативности политик. Ключевым выводом является необходимость комбинирования различных классов моделей для адекватного отражения сложности технологической системы. Эффективная политика суверенитета должна быть сфокусирована на формировании управляемых, устойчивых и адаптивных технологических контуров, обеспечивающих критическую самостоятельность в стратегических отраслях при сохранении возможности кооперации в дружественных рамках. Предложенный инструментарий способен стать основой для системы мониторинга и прогнозирования технологических рисков РФ [3].

Список литературы:

1. Кузнецова С.Н. Ключевые направления для обеспечения промышленно-технологического лидерства. Экономическое развитие России: тенденции, перспективы. Сборник статей по материалам XI Международной научно-практической конференции преподавателей вузов, ученых, специалистов, аспирантов, студентов. В 2-х томах. Нижний Новгород, 2025. С. 60-64.
2. Кузнецова С.Н. Механизмы реализации технологического партнерства и технологической независимости промышленных парков. Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XIX Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. Саров, 2025. С. 269-270.
3. Лозовой И.В., Романова М.А., Кузнецова С.Н. Адаптация отраслей к новым экономическим условиям: опыт и перспективы регионов. Экономическое развитие России: тенденции, перспективы. Сборник статей по материалам XI Международной научно-практической конференции преподавателей вузов, ученых, специалистов, аспирантов, студентов. В 2-х томах. Нижний Новгород, 2025. С. 280-283.

ПОЛИТИКА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ: УСПЕХИ, ПРОВАЛЫ И РЕАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОИЗВОДСТВО

Хрущева Ю.О., Дудин Д.М., Сидоров В.А., Умановский А.Е.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В условиях глобализации национальные экономики тесно связаны между собой через торговлю, инвестиции и технологическое сотрудничество. Однако геополитические конфликты, экономические санкции и нестабильность мировых рынков вынуждают государства пересматривать свою экономическую политику. Одним из ответов на такие вызовы становится политика импортозамещения.

Импортозамещение предполагает развитие собственного производства товаров и услуг, которые ранее закупались за рубежом. Основной задачей является обеспечение экономической безопасности, поддержка отечественных производителей и создание новых рабочих мест. Тем не менее, эффективность данной политики вызывает дискуссии среди экономистов, поскольку её реализация может сопровождаться как положительными, так и отрицательными последствиями.

Импортозамещение — это экономическая стратегия, направленная на сокращение доли импорта в потреблении за счёт развития национального производства.[1] Она может реализовываться через различные инструменты: тарифные и нетарифные ограничения, субсидии, налоговые льготы, государственные закупки.

Ключевые цели политики импортозамещения включают:

- снижение зависимости от внешних рынков;
- обеспечение технологической независимости;
- развитие внутреннего производства и промышленной базы;
- создание рабочих мест;
- укрепление национальной безопасности.

Особенно актуальной эта политика становится в условиях санкционного давления или ограниченного доступа к иностранным технологиям.

В ряде отраслей импортозамещение продемонстрировало заметные положительные результаты.

Во-первых, произошло развитие сельского хозяйства. Ограничение импорта продовольствия стимулировало рост внутреннего производства, модернизацию аграрного сектора и повышение уровня продовольственной безопасности. Некоторые страны смогли не только обеспечить себя основными продуктами питания, но и выйти на экспортные рынки.

Во-вторых, поддержка отдельных промышленных отраслей (например, машиностроения, фармацевтики, IT) способствовала росту внутреннего производства и появлению новых предприятий. Государственные инвестиции и программы поддержки позволили частично компенсировать недостаток иностранных технологий.

В-третьих, политика импортозамещения стимулировала развитие малого и среднего бизнеса. Увеличение спроса на отечественные товары создало возможности для новых компаний и предпринимателей.

Несмотря на отдельные успехи, политика импортозамещения сталкивается с рядом серьёзных проблем.

Одной из ключевых является технологическое отставание. Во многих случаях национальные производители не способны быстро заменить импортные товары по качеству и уровню технологий. Это особенно заметно в высокотехнологичных отраслях, таких как микроэлектроника, авиация и машиностроение.

Другой проблемой является рост издержек производства. Отсутствие конкуренции со стороны иностранных компаний может приводить к снижению эффективности, росту цен и ухудшению качества продукции.

Также важным фактором является ограниченность внутреннего рынка. Без доступа к глобальным рынкам производители сталкиваются с проблемами масштабирования бизнеса и внедрения инноваций.

Кроме того, чрезмерная государственная поддержка может приводить к неэффективному распределению ресурсов, коррупции и формированию зависимых от бюджета предприятий.

Влияние импортозамещения на производство неоднозначно и зависит от конкретной отрасли и условий реализации политики.

Положительное влияние проявляется в:

- росте загрузки производственных мощностей;
- увеличении занятости;
- формировании новых производственных цепочек;
- развитии локальных поставщиков.

Однако существуют и негативные последствия:

- снижение конкурентоспособности продукции;
- ограничение доступа к передовым технологиям;
- замедление инновационного развития;
- рост цен для конечных потребителей.

Таким образом, импортозамещение может быть эффективным инструментом в краткосрочной перспективе, особенно в кризисных условиях. Однако в долгосрочной перспективе его эффективность зависит от способности экономики интегрироваться в глобальные цепочки создания стоимости и развивать собственные технологии.

Политика импортозамещения является важным инструментом экономической политики, позволяющим государствам адаптироваться к внешним вызовам и укреплять внутреннее производство. Она может приносить значительные результаты в отдельных отраслях, особенно при грамотной государственной поддержке.

В то же время, импортозамещение не является универсальным решением. Его реализация сопровождается рядом рисков, включая снижение эффективности, технологическое отставание и рост издержек. Для достижения устойчивого экономического развития необходимо сочетать импортозамещение с мерами по стимулированию инноваций, развитию конкуренции и интеграции в мировую экономику.

Таким образом, успех данной политики определяется не только степенью ограничения импорта, но и качеством институциональной среды, уровнем технологического развития и стратегией долгосрочного роста.

Список литературы:

1. Готовский А. В. «Вклад импортозамещения в экономический рост России» // Вопросы экономики. — 2022. — №4. — С. 58–78.
2. Данилов-Данильян А. «10 мифов об импортозамещении» / А. Данилов-Данильян, Г. Никитин // Коммерсантъ-Деньги. — 2022. — №7. — С. 7–15.
3. Половинкин В. М. «Проблемы импортозамещения в отечественной экономике» / В. М. Половинкин, А. Б. Фомичев // Экология и охрана труда. — 2021. — №10. — С. 69–75.
4. Пономарева Т. Г. «Политика импортозамещения Российской Федерации в условиях санкций» / Т. Г. Пономарева, Е. В. Захарова // Вестник развития науки и образования. — 2021. — №12. — С. 20–27.
5. Ширяев А. «Об импортозамещении товаров широкого потребления» // Общество и экономика. — 2021. — №11. — С. 99–104.
6. Яковлев П. «Импортозамещение в Аргентине: цели и результаты» // Мировая экономика и международные отношения. — 2021. — Т. 60, №5. — С. 20–25.

АНАЛИЗ СВЯЗИ МЕЖДУ УРОВНЕМ КОРПОРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ И СТОИМОСТЬЮ КОМПАНИИ НА РАЗВИВАЮЩИХСЯ РЫНКАХ

Назарова Е.Н., Кузнецов В.П.

ФГБОУ ВО «Нижегородского государственного педагогического университета им. Козьмы Минина», г. Нижний Новгород

Актуальность исследования обусловлена повышенной значимостью качественного корпоративного управления как фактора снижения инвестиционных рисков и повышения предсказуемости бизнеса в условиях несовершенства институциональной среды развивающихся рынков. Целью работы является эмпирическая верификация гипотезы о наличии прямой корреляции между уровнем корпоративного управления, измеряемым через комплекс показателей, и рыночной стоимостью компаний. В качестве ключевого объекта исследования были выбраны компании, входящие в индексы MSCI Emerging Markets, с

фокусом на конкретных репрезентативных примерах, таких как южнокорейский чеболь Samsung Electronics и индийский конгломерат Tata Group [1,2].

Методология исследования базировалась на построении многофакторных регрессионных моделей, где зависимой переменной выступала рыночная капитализация или показатель Tobin's Q, а независимыми — индексы корпоративного управления, включающие показатели структуры совета директоров, защиты прав миноритарных акционеров, прозрачности раскрытия информации и системы вознаграждения менеджмента. Для компаний Samsung Electronics и Tata Group был проведен углубленный сравнительный анализ: первая демонстрирует эталонные стандарты управления с независимым советом директоров, что коррелирует с ее устойчивой премией к стоимости, тогда как вторая, несмотря на историческую сложную структуру собственности, показывает, как ее поэтапные реформы и усиление независимости совета положительно воспринимались рынком.

Вопрос о влиянии качества корпоративного управления на стоимость компании является центральным в современной корпоративной финансовой теории и практике. На развитых рынках эмпирическая связь между механизмами защиты прав акционеров, прозрачностью, эффективностью совета директоров и финансовыми результатами в значительной степени подтверждена. Однако на развивающихся рынках, к которым традиционно относятся и рынки стран БРИКС, включая Россию, эта взаимосвязь носит более сложный и неоднозначный характер. Специфика развивающихся экономик, характеризующаяся слабостью институциональной среды, высоким уровнем концентрации собственности, значительной ролью государства и непрозрачностью сделок, ставит под сомнение универсальность западных моделей. Тем не менее, именно в этих условиях совершенствование корпоративного управления может стать критическим источником создания дополнительной стоимости, снижая агентские издержки и риски, привлекая более дешевый капитал и повышая доверие инвесторов. Настоящий анализ посвящен комплексному исследованию эмпирических и теоретических аспектов данной взаимосвязи на развивающихся рынках, с фокусом на методологические подходы к оценке, каналы влияния и адаптацию лучших практик в условиях российской корпоративной реальности.

Корпоративное управление представляет собой систему взаимоотношений между менеджментом, советом директоров, акционерами и иными стейкхолдерами, определяющую направления развития компании и контроля за ее деятельностью. Теоретической основой анализа его влияния на стоимость выступает теория агентских издержек. В условиях разделения владения и контроля менеджеры могут действовать в ущерб интересам акционеров, преследуя личные цели, что приводит к потерям в стоимости. Качественное корпоративное управление призвано минимизировать эти издержки через систему сдержек и противовесов. Влияние на стоимость осуществляется через несколько ключевых каналов [2].

Во-первых, это снижение стоимости привлекаемого капитала. Инвесторы, особенно иностранные институциональные, готовы платить премию за акции компаний с высоким уровнем защиты миноритарных акционеров, предсказуемой дивидендной политикой и прозрачной финансовой отчетностью, так как это снижает риски экспроприации и асимметрии информации. Эмпирические исследования демонстрируют, что компании с высокими стандартами раскрытия информации имеют более низкую стоимость собственного капитала. Во-вторых, эффективное корпоративное управление повышает операционную эффективность. Независимый и компетентный совет директоров обеспечивает более качественный надзор за стратегией и рисками, способствует принятию оптимальных инвестиционных решений и препятствует реализации деструктивных проектов менеджмента.

В-третьих, оно снижает риск возникновения корпоративных конфликтов и репутационных потерь, которые напрямую воздействуют на рыночную капитализацию. Конфликты между мажоритарными и миноритарными акционерами, как это неоднократно наблюдалось на российском рынке, приводят к существенным негативным ценовым реакциям и долгосрочному оттоку инвесторов. Таким образом, корпоративное управление выступает в роли важнейшего нематериального актива, формирующего доверие и снижающего дисконт в оценке компании.

Ключевой проблемой эмпирической верификации связи является квантификация как качества корпоративного управления, так и его эффекта на стоимость. Качество корпоративного управления является латентной, многомерной переменной. Для ее оценки исследователи и рейтинговые агентства разрабатывают сложные индексы, агрегирующие десятки показателей. Ведущими международными поставщиками таких оценок являются

Institutional Shareholder Services (ISS), Sustainalytics, MSCI. На развивающихся рынках значительную работу проводят местные институты. В России, например, рейтинги корпоративного управления регулярно публикуют Национальное рейтинговое агентство, агентство «Эксперт РА», а также Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации [1].

Однако данная связь нелинейна и опосредована спецификой российского рынка. Во-первых, для России характерна экстремально высокая концентрация собственности, часто в руках государства или узких групп физических лиц. В таких условиях классические механизмы управления, нацеленные на разрешение агентского конфликта между распыленными акционерами и менеджментом, уступают по значимости проблеме взаимоотношений между контролирующим и миноритарными акционерами. Следовательно, компоненты индекса, связанные с защитой прав миноритариев и равным отношением ко всем акционерам, оказывают на стоимость большее влияние, чем, например, наличие номинально независимых директоров.

Во-вторых, значительная доля крупнейших компаний находится под прямым или косвенным контролем государства. В государственных корпорациях целевая функция может отличаться от максимизации стоимости для акционеров, включая социальные или политические задачи, что ослабляет наблюдаемую эмпирическую связь. В-третьих, наследие непрозрачных схем и офшорных структур в истории собственности многих компаний создает дополнительный дисконт, преодолеть который формальные улучшения в практике раскрытия информации могут лишь отчасти. Качественный анализ конкретных российских компаний иллюстрирует эту динамику.

В качестве эмпирического подтверждения тезиса о влиянии качества корпоративного управления на рыночную оценку бизнеса часто приводят опыт публичных компаний, системно внедрявших лучшие практики. Так, в российской корпоративной среде к числу признанных лидеров традиционно относят ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Сбербанк», ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «МТС». Эти организации не только устойчиво занимают верхние строчки в рейтингах корпоративного управления (например, по версии Российского института директоров или рейтинга НКР), но и демонстрируют долгосрочную тенденцию к торговавшемуся с меньшим дисконтом по отношению к своим отраслевым аналогам. Примечательно, что разница в капитализации сохраняется даже при сопоставлении с компаниями, имеющими близкие финансовые показатели, но менее развитую систему управления. В основе этой устойчивой разницы — комплекс институциональных решений: переход на отчетность по МСФО ещё до того, как это стало обязательным требованием; внедрение электронного голосования на собраниях акционеров; введение в советы директоров независимых директоров с международной репутацией; а также регулярная публикация детальных отчётов в области устойчивого развития, которые всё чаще рассматриваются инвесторами как индикатор транспарентности.

Анализ связи между уровнем корпоративного управления и стоимостью компании на развивающихся рынках показывает, что эффективное корпоративное управление поддерживает капитализацию, инвестиционную привлекательность и долгосрочную устойчивость бизнеса. Так, исследование CG Index, в котором участвовали компании с разным уровнем зрелости корпоративного управления. Выяснилось, что компании, входящие в верхний квартиль по уровню зрелости корпоративного управления, показали результаты выше своих конкурентов. В частности, они сгенерировали в 3,4 раза больше операционного денежного потока, что свидетельствует о более эффективном управлении оборотным капиталом. Кроме этого, исследование Grant Thornton, в котором анализировали динамику компаний, постепенно повышавших свой уровень корпоративного управления. Результаты показали, что улучшение корпоративного управления всего на один квартиль было связано со средним увеличением операционного денежного потока на 44%. Также есть исследование, проведённое научными сотрудниками Института экономики РАН на основе выборки из 75 публичных компаний за 2011–2017 годы. Было установлено, что качество корпоративного управления оказывает статистически значимое положительное влияние на рыночную капитализацию. Особенно сильной оказалась взаимосвязь факторов, связанных с дивидендной политикой и корпоративной социальной ответственностью.

Проанализировало базу данных Grant Thornton UK Corporate Governance Index (CG Index) для 506 компаний, входящих в фондовый индекс Великобритании (FTSE 350), за десятилетний период с 2007 по 2017 год. Выявило, что высокий уровень корпоративного

управления связан с повышением эффективности бизнеса: компании, входящие в верхний квартиль по уровню зрелости управления, показали результаты выше своих конкурентов. Среди результатов можно было выделить: Улучшение корпоративного управления всего на один квартиль было связано со средним увеличением операционного денежного потока на 44%; Такие компании демонстрировали прирост свободного денежного потока на 46%, что расширяет возможности для инвестиций и возврата средств акционерам; Компании с сильным корпоративным управлением в два раза чаще оставались в индексе FTSE 350, что свидетельствует о их способности сохранять конкурентоспособность и ценность в долгосрочной перспективе.

Исследование Х.А. Чупановой отражает взаимосвязь между показателями корпоративного управления и стоимостью американских страховых компаний. Выявило, что корпоративная финансовая политика влияет на стоимость компании: результаты оценки коэффициентов показывают отрицательную связь стоимости с коэффициентом финансового левериджа и ростом фирмы, но положительную — с отношением цены акции к доходу из расчёта на одну единицу.

Исследование Университета Перуджи на основе данных ESG-Рейтинга устойчивого корпоративного управления 2020 и 2021 годов. Подтвердило положительную связь между уровнем устойчивого корпоративного управления и финансовой результативностью компании. В качестве зависимой переменной использовалась рыночная стоимость, выраженная в виде показателя MBV (соотношение рыночной и балансовой стоимости компании).

Эмпирический анализ Института экономики РАН на основе выборки из 75 публичных компаний за 2011–2017 годы установил, что качество корпоративного управления оказывает статистически значимое положительное влияние на рыночную капитализацию. Особенно сильной оказалась взаимосвязь факторов, связанных с дивидендной политикой и корпоративной социальной ответственностью.

Практическим следствием этого становится доступ компании к более широкому и дешёвому капиталу. В условиях, когда многие российские эмитенты продолжают торговаться с дисконтом к сопоставимым зарубежным аналогам (по оценкам Московской биржи, средний дисконт по сектору «нефтегаз» в отдельные периоды достигал 30–40 %), целенаправленное повышение стандартов управления превращается в один из наиболее действенных инструментов роста фундаментальной стоимости. Причём эффект носит кумулятивный характер: последовательные институциональные улучшения постепенно формируют репутационный капитал, способный амортизировать влияние внешних шоков — от колебаний сырьевых цен до введения санкционных ограничений. По наблюдениям аналитиков рейтингового агентства «Эксперт РА», компании, входящие в топ-20 по качеству управления, демонстрируют на 25–30 % меньшую волатильность котировок в периоды кризисов по сравнению с остальными участниками рынка.

Таким образом, можно сделать вывод, что качество корпоративного управления сильнее влияет на стоимость компании в странах со слабой правовой средой, где законодательство не может в полной мере защитить интересы миноритарных акционеров и обеспечить соблюдение высоких стандартов бухгалтерской отчётности.

В этой связи инвестиции в развитие корпоративного управления перестают быть просто затратами на соответствие формальным требованиям, а приобретают характер стратегических вложений, конвертируемых в долгосрочную рыночную оценку. Дальнейшие исследования, вероятно, должны быть направлены на уточнение вклада отдельных компонентов управления — например, состава и независимости совета директоров, качества раскрытия информации, процедур управления рисками — в итоговую премию за качество. Не менее важно изучить динамику этой взаимосвязи в условиях меняющейся регуляторной среды, в том числе под влиянием глобальных ESG-трендов, которые в последние годы существенно изменили ожидания инвесторов. Для российского корпоративного сектора главным императивом становится переход от формального соблюдения требований (будь то кодексы корпоративного управления или требования ЦБ РФ) к глубокой интеграции принципов эффективного и ответственного управления в саму бизнес-модель. Без этого, как показывает анализ, рассчитывать на устойчивый рост капитализации в условиях глобальной конкуренции за инвестиционные ресурсы становится всё сложнее.

Список литературы:
1. Кузнецов, В. П. Зеленая экономика: новые вызовы для России / В. П. Кузнецов, Е. Н. Назарова // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2024. – № 4(68). – С. 209-219. – DOI 10.26456/2219-1453/2024.4.209-219.
2.Назарова, Е. Н. Особенности устойчивого предпринимательства / Е. Н. Назарова // Актуальные вопросы устойчивого развития современного общества и экономики: Сборник научных статей 3-й Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х томах, Курск, 25 апреля 2024 года. – Курск: ЗАО "Университетская книга", 2024. – С. 336-339.

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗА «ИДЕАЛЬНОГО РАБОТОДАТЕЛЯ» ДЛЯ ВЫПУСКНИКОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ (ПО ДАННЫМ ОПРОСА В САРФТИ НИЯУ МИФИ)

Максимова Е.А., Блохин К.М.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В условиях кадрового дефицита, охватившего как высокотехнологичные отрасли, так и финансово-банковский сектор российской экономики, проблема привлечения и удержания молодых специалистов приобретает стратегическое значение. По оценкам экспертов, совокупная кадровая потребность Госкорпорации «Росатом» до 2030 года составляет более 350 тыс. человек, значительную часть из которых должны составить выпускники профильных вузов [1]. Одновременно с этим сектор финансов и кредита испытывает растущую потребность в специалистах, владеющих как цифровыми компетенциями, так и пониманием специфики реального сектора экономики. В IT-сфере дефицит кадров, по оценкам экспертов, превышает 500–700 тыс. специалистов, что делает борьбу за молодые таланты одним из ключевых вызовов для работодателей.

В этих условиях формирование привлекательного HR-бренда становится не просто функцией отдела персонала, а ключевым фактором конкурентоспособности предприятий. Однако практика взаимодействия работодателей с молодыми кадрами часто сталкивается с проблемой рассогласования ожиданий. Работодатели традиционно делают акцент на внутренних трудовых ценностях (интерес к работе, ответственность, вовлеченность), тогда как студенты демонстрируют более прагматичную ориентацию на внешние атрибуты — заработную плату, стабильность и социальные гарантии [3]. Преодоление этого разрыва невозможно без глубокого понимания того, как именно студенты структурируют свои представления об «идеальном работодателе».

Особый интерес в этой связи представляет сравнительный анализ представлений студентов разных направлений подготовки, поскольку каждый сектор экономики предъявляет специфические требования к кандидатам и формирует особую ценностную структуру трудовых ожиданий.

Цель исследования — выявление и сравнительный анализ латентных факторов, структурирующих образ «идеального работодателя» для студентов направлений «Финансы и кредит» и «Информационные технологии».

Задачи исследования:

1. Провести анализ теоретических подходов к изучению трудовых ценностей молодежи.
2. Разработать инструментарий для сбора эмпирических данных.
3. Выявить иерархию критериев привлекательности работодателя для каждого из направлений подготовки.
4. Методом факторного анализа определить латентные факторы, объединяющие отдельные критерии, в разрезе двух направлений.
5. Провести сравнительный анализ ценностных профилей студентов-финансистов и студентов-айтишников.
6. Сформулировать практические рекомендации для центра карьеры вуза.

Объект исследования: студенты выпускных курсов СарФТИ НИЯУ МИФИ.

Предмет исследования: структура представлений студентов об идеальном работодателе, включающая совокупность критериев выбора места работы, их внутренние взаимосвязи, а также различия между направлениями подготовки «Финансы и кредит» и «Информационные технологии».

Методология исследования. Теоретико-методологическую основу работы составили концепции трудовых ценностей, разделяющие внешние и внутренние аспекты трудовой

мотивации. Эмпирическая база — данные анкетного опроса студентов выпускных курсов (N=100), в том числе 50 студентов направления «Финансы и кредит» и 50 студентов направления «Информационные технологии».

Таблица 1. Сравнение значимости критериев по направлениям подготовки (средняя оценка, 1–5)

Финансы и кредит	Оценка	Информационные технологии	Оценка
Стабильность компании	4,78	Стабильность компании	4,18
Социальный пакет и льготы	4,7	Социальный пакет и льготы	4,4
Высокий уровень заработной платы	4,62	Высокий уровень заработной платы	4,74
Интересные, сложные задачи	4,34	Интересные, сложные задачи	4,48
Дружный коллектив	4,16	Дружный коллектив	4,04
Возможность карьерного роста	4,22	Возможность карьерного роста	4,54
Престиж компании	3,78	Престиж компании	3,26
Обучение за счет компании	3,92	Обучение за счет компании	3,78
Возможность командировок	3,12	Возможность командировок	2,72
Гибкий график работы	3,46	Гибкий график работы	4,5

Представленные данные свидетельствуют о существенных различиях в ценностных приоритетах студентов двух направлений.

Студенты направления «Финансы и кредит» демонстрируют ярко выраженную ориентацию на стабильность и социальные гарантии. Три лидирующих критерия — стабильность компании (4,78), социальный пакет (4,70) и высокая заработная плата (4,62). При этом гибкий график работы занимает последнее место (3,46), что отражает специфику финансовой сферы, где работа традиционно привязана к офису и режиму работы организации. Значимость престижа компании (3,78) также выше, чем у IT-шников, что говорит о важности репутационного капитала в финансовой сфере.

Студенты направления «Информационные технологии» демонстрируют ориентацию на гибкость и карьерный рост. Гибкий график работы занимает первое место (4,50), что является уникальной особенностью IT-сектора, где широко распространены удаленная работа и гибкие форматы занятости. Высокая заработная плата (4,74) и возможность карьерного роста (4,54) также входят в тройку лидеров. Стабильность компании (4,18) и социальный пакет (4,40) имеют для IT-шников существенно меньшее значение, чем для финансистов.

Таблица 2. Сравнение факторных структур направлений подготовки

Параметр	Финансы и кредит	Информационные технологии
Доминирующий фактор	Институциональная надежность (32,4%)	Гибкость и развитие (29,6%)
Ключевые критерии	Стабильность, соцпакет, зарплата	Гибкий график, карьерный рост, интересные задачи
Второй по значимости фактор	Профессиональная самореализация (19,8%)	Материальное вознаграждение (18,4%)
Наименее значимый фактор	Мобильность (9,7%)	Внешние атрибуты (11,1%)
Особенности	Высокая значимость стабильности и соцпакета, низкая — гибкости	Высокая значимость гибкости и карьерного роста, умеренная — стабильности

Для студентов-финансистов доминирующим является фактор **«Институциональная надежность»** (32,4% дисперсии), объединяющий стабильность компании, социальный пакет и заработную плату. Это отражает ориентацию на работу в крупных финансовых институтах с развитой системой гарантий. Второй фактор — **«Профессиональная**

самореализация» (19,8%) — включает внутренние ценности, связанные с содержанием труда. Третий фактор — **«Социальный комфорт»** (12,5%) — объединяет дружный коллектив и престиж компании. Четвертый, наименее значимый фактор — **«Мобильность»** (9,7%) — включает командировки и гибкий график, что подтверждает низкую значимость этих критериев для данной группы.

Для студентов IT-направления структура факторов принципиально иная. Доминирующим является фактор **«Гибкость и развитие»** (29,6% дисперсии), объединяющий гибкий график, карьерный рост и интересные задачи. Это отражает специфику IT-рынка, где ценятся автономия, возможность быстрого профессионального роста и работа над технологически сложными проектами. Второй фактор — **«Материальное вознаграждение»** (18,4%) — включает высокую зарплату и социальный пакет, однако его вес ниже, чем у фактора гибкости и развития. Третий фактор — **«Стабильность и среда»** (14,2%) — объединяет стабильность компании и дружный коллектив. Четвертый фактор — **«Внешние атрибуты»** (11,1%) — включает престиж, обучение и командировки.

Сравнительный анализ факторов

Выявленные различия имеют как теоретическое, так и практическое значение. Для студентов-финансистов образ идеального работодателя ассоциируется с крупной, стабильной организацией, предоставляющей широкий социальный пакет и долгосрочные гарантии занятости. Для студентов-айтишников идеальный работодатель — это компания, предлагающая гибкие условия труда, возможности для быстрого карьерного роста и работу над интересными технологическими задачами, при этом материальное вознаграждение является важным, но не единственным фактором.

Эти различия отражают объективные особенности рынков труда в двух секторах. Финансовый сектор характеризуется высокой степенью регулирования, иерархичностью и долгосрочными трудовыми отношениями. IT-сектор, напротив, отличается высокой динамикой, горизонтальными структурами и распространением гибких форм занятости.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило гипотезу о том, что образ идеального работодателя имеет различную факторную структуру в зависимости от направления подготовки студентов. Выявленные различия между студентами направлений «Финансы и кредит» и «Информационные технологии» свидетельствуют о том, что ценностные ориентации будущих специалистов формируются под влиянием специфики отраслевых рынков труда и профессиональной культуры.

Для студентов-финансистов доминирующим является фактор «Институциональная надежность», объединяющий стабильность компании, социальный пакет и высокую заработную плату. Это подтверждает теоретические положения о значимости внешних ценностей для студентов, ориентированных на работу в регулируемых отраслях [3].

Для студентов IT-направления доминирующим является фактор «Гибкость и развитие», объединяющий гибкий график работы, карьерный рост и интересные задачи. Это отражает специфику IT-сектора, где ценятся автономия, динамика и профессиональное развитие.

Практические рекомендации для центра карьеры СарФТИ НИЯУ МИФИ:

Учитывать выявленные различия в ценностных профилях при карьерных консультациях: студентам-финансистам рекомендовать компании с развитым соцпакетом и долгосрочными гарантиями; студентам IT — компании с гибкими форматами занятости и интенсивными программами развития. Информировать компании-партнеры о результатах исследования для адаптации их презентационных материалов на ярмарках вакансий. Развивать дифференцированные программы стажировок, учитывающие специфику ценностных ориентаций студентов разных направлений. Информировать компании о результатах исследования для адаптации презентационных материалов на ярмарках вакансий.

Список литературы:

1. Гринатом выступил стратегическим партнером конференции HR EXPO PRO // Официальный сайт АО «Гринатом». — 2025. — 9 сентября. — URL: https://greenatom.ru/atom-rita/ (дата обращения: 25.03.2026).
2. Поплавская А.А. Трудовые ценности студентов бакалавриата: опыт эмпирического исследования // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. — 2022. — № 3. — С. 112-135.

3. Cherepanova N. Expectations of Graduates and Employers in the New Realities of the Labour Market: Marketing Approach // Выпускная квалификационная работа НИУ ВШЭ. — 2025. — URL: https://www.hse.ru/ (дата обращения: 25.03.2026).
4. Маслова Е.В., Широкова Л.В. Цифровая трансформация рынка труда: новые требования к компетенциям работников // Вопросы экономики. — 2023. — № 4. — С. 67–82.

АНАЛИЗ ПОЛИТИЧЕСКИХ, ЭКОНОМИЧЕСКИХ, СОЦИАЛЬНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МИРЕ И РОССИИ

Мисатюк Е.В.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Объект исследования: деятельность по использованию атомной энергии в мире и России. *Предмет исследования*: политические, экономические, социальные и технологические аспекты, которые могут повлиять на развитие ядерных технологий в мире и России. *Цель работы*: провести комплексный анализ основных факторов, влияющих на деятельность по использованию атомной энергии в мире и России, сформировать комплексное понимание рисков влияния внешней среды на этот вид деятельности, создать надежную основу для принятия стратегических решений.

Для исследования использован метод PEST-анализа, который предполагает изучение четырех ключевых направлений: политических (Political), экономических (Economic), социальных (Social) и технологических аспектов (Technological), которые могут повлиять на развитие ядерных технологий в мире и России [1].

1. Основные факторы PEST-анализа деятельности по использованию атомной энергии в мире и России

Рассмотрим основные факторы PEST-анализа деятельности по использованию атомной энергии в мире и России.

1.1. Политические аспекты развития деятельности по использованию атомной энергии в мире и России.

Политические возможности развития деятельности по использованию атомной энергии связаны с обеспечением обороноспособности, энергобезопасности и ростом спроса на экологически чистую энергогенерацию. Россия занимает лидирующие позиции, используя атомную энергетику как инструмент геополитического влияния и экспорта высоких технологий через Государственную корпорацию по атомной энергии «Росатом», строя энергоблоки за рубежом и увеличивая долю атомной генерации внутри страны до 25% к 2040 году [1].

Основные политические угрозы в мире:

- Геополитическое давление: Использование ядерной безопасности как инструмента политического влияния, попытки западных стран ограничить влияние России и Китая на рынке ядерных технологий.
- Санкции и технологические ограничения: Ограничение поставок оборудования и технологий, а также блокировка участия в проектах, что замедляет строительство новых АЭС.
- «Зеленый» популизм и общественное мнение: Экологические партии часто выступают против атомной энергии, требуя ее замены на возобновляемые источники (ВИЭ), что влияет на принятие государственных решений.
- Риски нераспространения: Опасения по поводу двойного использования ядерных технологий, что ведет к ужесточению международного контроля.
- Нарушение Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО): Несмотря на неотъемлемое право любой страны на развитие атомных технологий, сегодня мы наблюдаем, как США создают препятствия на пути развития атомной энергетики в глобальном масштабе.
- Политика двойных стандартов: США придерживаются выборочного подхода к проблеме ядерного распространения. Как показала история, страны, которые сотрудничали с Вашингтоном, получали «молчаливое согласие» на свои ядерные программы (Израиль, Индия,

[1] Апян Меланья. «Что такое PEST-анализ и как его провести». Журнал «Генеральный директор», февраль 2025. Источник: https://www.gd.ru/articles/8800-pest-analiz

Пакистан). В то же время те, чьи позиции не совпадали с интересами США, сталкивались с беспрецедентным давлением ввиду своих ядерных проектов (например, Иран).

1.2. Экономические аспекты развития деятельности по использованию атомной энергии в мире и России.

Экономика деятельности по использованию атомной энергии базируется на высокой капиталоемкости строительства при низких операционных расходах. В большинстве стран АЭС становятся поставщиком электроэнергии с наименьшими издержками, так как расходы на природный уран составляют около 5% от совокупных затрат на производство. Это позволяет относительно защитить производителей от колебаний цен на сырье. [2]. Россия занимает 4-е место в мире, обеспечивая ~20% своей генерации, и активно экспортирует технологии, наращивая к 2040 г. долю до 25% [3]. Мировой тренд — декарбонизация и малые модульные реакторы, сдерживаемые высокой стоимостью утилизации отходов.

Основные экономические аспекты в мире:

- Рост и инвестиции: Рост производства АЭС, где лидерами являются США, Китай, Франция, Россия. В 2025 году мировое производство атомной энергии выросло.
- Преимущества: Высокая эффективность, стабильность базовой нагрузки и снижение выбросов парниковых газов (является основой современного низкоуглеродного развития и энергоперехода к низкоуглеродной экономике) .
- Вызовы: Высокие начальные затраты на строительство, риск радиационных аварий, проблемы с хранением отработанного топлива.

1.3. Социально-культурные аспекты развития деятельности по использованию атомной энергии ***в мире и России***

Социально-культурные аспекты развития атомной отрасли включают борьбу с климатическими изменениями, обеспечение энергетической независимости, общественное восприятие безопасности и развитие инфраструктуры территорий. Мировой тренд сдвигается от отказа к «атомному ренессансу» (Бельгия, Швеция, Китай), в то время как Россия делает упор на технологическое лидерство, экологию и социальную поддержку в регионах присутствия.

Основные социально-культурные аспекты в мире:

- Достижение «Целей устойчивого развития»: Атомная энергетика становится важнейшим инструментом в достижении «Целей устойчивого развития» ООН, принятые в 2015 году (Цель 7 в области устойчивого развития: недорогостоящая и чистая энергия[2]).
- «Атомный ренессанс»: Многие страны (Бельгия, Корея, Швеция) пересматривают отказы от АЭС из-за необходимости надежного энергоснабжения.
- Принятие обществом и безопасность: Вопросы безопасности и утилизации ядерных отходов остаются главными факторами, формирующими общественное мнение, особенно в Европе. После аварии на АЭС Фукусима-1 (7-й уровень по шкале INES) фокус сместился на ужесточение стандартов безопасности (проведены стресс-тесты АЭС) и прозрачность, что формирует культуру безопасности, где риски минимизируется.
- Энергетическая безопасность: Атомная энергетика рассматривается как способ уменьшения зависимости от импорта ископаемого топлива, обеспечивая социальную стабильность.

1.4. Технологические аспекты развития деятельности по использованию атомной энергии в мире и России

Развитие деятельности по использованию атомной энергии ориентировано на создание замкнутого ядерно-топливного цикла (ЗЯТЦ), реакторов на быстрых нейтронах (БН) и малых модульных реакторов (ММР) для повышения безопасности и эффективности. Россия в лице Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» — мировой лидер по одновременному сооружению атомных энергоблоков, включая использование технологии БН-800/1200 и плавучие АЭС, стремясь к двухкомпонентной энергетике.

Основные *технологические аспекты* в мире:

- Реакторы IV поколения (Gen IV): Разработка высокотемпературных газовых реакторов (HTGR), жидкосолевых реакторов (MSR). Переход от экспериментальных моделей к демонстрационным.

[2] Цели в области устойчивого развития. Цель 7 в области устойчивого развития: недорого-стоящая и чистая энергия. Сайт ООН:https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/energy/

- Малые модульные реакторы (ММР)**:** Стремление к унификации, заводскому производству Малых модульных реакторов (ММР) для снижения капитальных затрат.
- Термоядерный синтез: Международные исследования (ITER).
- Продление срока эксплуатации: Модернизация действующих АЭС для продления работы до 60-80 лет.

1.5. PEST-анализ деятельности по использованию атомной энергии в России

В таблице 1 представлен PEST-анализ деятельности по использованию атомной энергии в России:

Таблица 1 - PEST-анализ деятельности по использованию атомной энергии в России

Политические возможности: • **Высокая государственная поддерж-ка:** Атомная отрасль России является стратегической отраслью, обеспечивающей обороноспособность, энергетическую безопасность и энергонезависимость. • **Геополитическое влияние: «**Росатом» - мировой лидер по строительству АЭС, что позволяет формировать долгосрочные (50-80 лет) партнерские отношения с другими государствами, несмотря на санкции. • **Экспортная ориентация:** Строительство АЭС в дружественных странах (Китай, Индия, Турция, Бангладеш), что усиливает влияние РФ. • **Активное сотрудничество с МАГАТЭ:** Участие в международных проектах по безопасности и сотрудничеству.	**Экономические возможности:** • **Госстратегия:** Планируется строительство 12 новых энергоблоков к 2035 г., ориентир на 25% атомной генерации к 2040 г. [3]. • **Преимущества:** Наличие собственных месторождений урана, технологий полного цикла и конкурентоспособность Росатома на мировом рынке. • **Рост выручки от экспорта:** Росатом - ключевой игрок на мировом рынке инжиниринга. • **Стабильный спрос:** Атомная энергия обеспечивает базовую нагрузку в энергосистеме России. • **Высокая стоимость строительства АЭС**: необходимость импортозамещения оборудования и сложная логистика [4]..
Социально-культурные возможности: • **Высокий престиж отрасли:** Работа в атомной сфере обеспечивает социальные гарантии. • **Социальная ответственность:** «Росатом» обеспечивает высокие стандарты жизни в атомградах, создавая рабочие места и развивая городскую инфраструктуру. • **Экологическое восприятие:** АЭС воспринимаются как низкоуглеродный источник, предотвращающий выбросы CO_2, что важно для борьбы с глобальным потеплением. • **Общественное мнение:** Высокая степень доверия к технологиям благодаря успешной эксплуатации и внедрению современных атомных энергоблоков с реакторами повышенной безопасности, которые соответствуют строгим постфукусимским требованиям.	**Технологические возможности:** • **Лидерство в технологиях:** Россия активно внедряет совместную работу реакторов на тепловых (ВВЭР) и быстрых нейтронах (БН) для минимизации радиоактивных отходов и замыкания ядерного топливного цикла. • **Реакторы на быстрых нейтронах:** Создание уникальных технологий промышленных реакторов (БН-800, БН-1200), способных «дожигать» отработавшее ядерное топливо, превращая его в энергию. • **Малая атомная энергетика:** Разработка мобильных и маломощных блоков (в т.ч. плавучих АЭС) для удаленных территорий, таких как Чукотка. • **Безопасность и цифровизация:** Повышение устойчивости систем управления, использование цифровых двойников для проектирования и эксплуатации АЭС.

Заключение

Подводя итог, можно сделать вывод что, несмотря на геополитическую напряженность, ядерные технологии в мире продолжают развиваться. PEST-анализ ядерных технологий в мире и России показывает, что их развитие определяется сложным балансом политической поддержки (низкоуглеродная повестка), экономической целесообразности (высокие капзатраты), социальным восприятием безопасности и технологическим прогрессом в области развития малых модульных реакторов. Ядерные технологии России характеризуются высокой устойчивостью благодаря внутренним технологическим разработкам и государственной поддержке. Ключевые вызовы связаны с нарушениями международного права, сильнейшим

внешнеполитическим давлением, которое требует возвращения в правовые рамки, форсированного импортозамещения и переориентации экспортных потоков.

Список литературы:

1. Горин Н. В., Екидин А. А., Головихина О. С. Атомная энергетика в национальных проектах России //Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2021. – №. 1. – С. 5-15.
2. Галковская, В. Е. Применение зарубежного опыта оценки стоимости ядерной энергии в российской практике / В. Е. Галковская, Ю. В. Вертакова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. – 2019. – Т. 9. – № 6(35). – С. 104-114.
3. Федеральный закон от 30.11.2024 N 419-ФЗ (ред. от 04.11.2025) "О федеральном бюджете на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов"
4. Жизнин С. З., Тимохов В. М. Геополитические и экономические аспекты развития ядерной энергетики // Вестник МГИМО. 2015. №4 (43).

ПРОБЛЕМА РАСКРЫТИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРИ IPO НА РОССИЙСКОМ ФОНДОВОМ РЫНКЕ И СПОСОБЫ ЕЁ РЕШЕНИЯ В РАМКАХ ЗАЩИТЫ МИНОРИТАРНЫХ АКЦИОНЕРОВ

Толоконников В.Е.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В контексте данной работы миноритарный акционер – это розничный инвестор, покупающий акции тех или иных компаний на бирже. Миноритарный акционер уязвим перед возможностями крупных игроков на рынке ценных бумаг, а также действиями менеджмента и мажоритарных акционеров, что влияют на принятие всех ключевых решений в компаниях.
Устойчивое развитие экономики напрямую зависит от способности фондового рынка аккумулировать инвестиции и эффективно их перераспределять. Формирование развитого и ликвидного фондового рынка является важным условием для обеспечения долгосрочного экономического роста.

В 2024 году развитие фондового рынка было возведено в ранг национального стратегического приоритета. Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 [1] устанавливает амбициозные целевые показатели, выполнение которых характеризует достижение национальной цели «Устойчивая и динамичная экономика». В частности, к 2030 году необходимо обеспечить рост капитализации фондового рынка до уровня не менее 66% ВВП, а к 2036 году - до 75% ВВП. Доли долгосрочных сбережений граждан в общем объеме их сбережений должны достичь не менее чем до 40% к 2030 году и до 45% к 2036 году.

Капитализация - это произведение количества акций на их рыночную цену. Цена же формируется, прежде всего, от отношения риска и доходности. Реальные и потенциальные конфликты, возможность принудительного выкупа по несправедливой цене, непредсказуемая дивидендная политика, проблемы с доступом к достоверной информации - все это заставляет инвесторов требовать более высокой премии за риск. Это выражается в более низких коэффициентах P/E (цена/прибыль) и P/B (цена/балансовая стоимость) по сравнению с компаниями из стран, где государство берёт на себя часть рисков розничных инвесторов, законодательно закрепляя те или иные способы защиты миноритария. Пока акционеры повсеместно сталкиваются с множеством необузданных рисков, рост капитализации до 75% ВВП будет искусственно затруднен, так как компании будут недооценены.

Для оценки масштаба задачи, поставленной Указом Президента РФ № 309, необходимо рассмотреть динамику отношения капитализации фондового рынка к валовому внутреннему продукту. На основе данных Росстата и Московской Биржи [2][3], построен график, отражающий изменение этого показателя за 2013-2025 годы. Тенденция последних лет: стагнация на фоне роста ВВП. Если в 2021 году отношение составляло примерно 46,5%, то к 2025 году оно снизилось до 24,7%, то есть сократилось почти вдвое. Примечательно, что номинальный ВВП за этот период вырос более чем в 1,5 раза (со 134,7 трлн до 213,5 трлн руб.), тогда как капитализация не только не увеличилась, но и уменьшилась (с 62,6 трлн до 52,8 трлн руб.). Это свидетельствует о том, что фондовый рынок не выполняет свою ключевую функцию - аккумулирование и перераспределение капитала пропорционально росту экономики. Причины такого расхождения кроются в оттоке нерезидентов, замедление роста гражданского

сектора экономики из-за высокой ставки ЦБ и, что особенно важно в контексте данной работы, в сохраняющемся недоверии миноритарных акционеров.

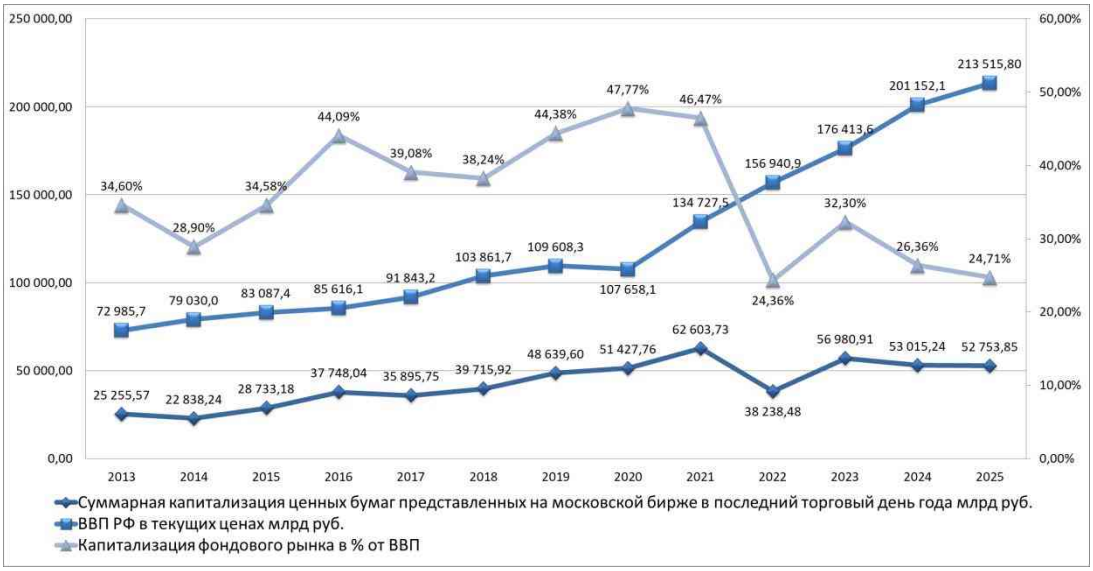


Рис. 1. Примерная капитализация фондового рынка РФ в процентах от ВВП, капитализация рассчитана по акциям, имеющим листинг на Московской бирже и торговавшимся в последний день года, что может приводить к некоторому искажению абсолютных значений, однако общая динамика и пропорции отражают реальную тенденцию.

Для достижения необходимого уровня капитализации необходим колоссальный рост рыночной стоимости компаний - либо за счёт многократного увеличения котировок, либо за счёт массового выхода новых эмитентов на биржу, либо сочетания обоих факторов. Однако в условиях текущих темпов роста экономики и оттока нерезидентов, без решения фундаментальной проблемы - восстановления доверия инвесторов - такой рост будет затруднён.

IPO (Первичное Публичное Предложение) - это размещение акций компании на бирже для широкой продажи. 2024 год стал рекордным по количеству публичных размещений акций на российском рынке за последнее десятилетие. «Согласно обзору Банка России публичные размещения и предложения акций 2024» [4], было проведено 19 публичных размещений, из которых 15 - первичные (IPO), что на 58% больше, чем в 2023 году. Однако по расчётам банка России средняя доходность IPO 2024 за 6 месяцев равна -25,8%.

Мы отмечаем рост влияния розничного инвестора на рынке IPO, так по данным ЦБ за 2024 г. произошел рост доли участия в публичных размещениях розничных инвесторов с 18% (23,6 млрд руб.) до 40% (40,5 млрд руб.) [4].

Согласно исследованию А.Е. Абрамова и М.И. Черновой, опубликованному в «Финансовом журнале» (Том 16, №6, 2024) [5]. «С конца 2022 г. в России возникла новая волна сделок IPO». При этом авторы отмечают, что «рисками снижения эффективности сделок IPO новой волны, проявившимися в первой половине 2024 г., являются уменьшение размеров недооценки, увеличение доли сделок SPO, а также сделок без привлечения капитала». На основании аналитического материала ЦБ мы видим реализацию некоторых рисков. Так, например 2024 году значительно выросла доля размещений, в рамках которых действующие акционеры продавали свои пакеты акций (cash-out). По данным ЦБ доля cash-out в общем объеме публичного размещения выросла с 12% до 48% [4]. Это означает, что почти половина привлеченных средств досталась не компаниям для развития бизнеса, а уходящим акционерам. Такая структура размещения создает конфликт интересов: продающие акционеры заинтересованы в максимальной цене размещения, даже если она не соответствует долгосрочным перспективам компании.

Банк России в своем докладе «Информационная прозрачность на рынке ценных бумаг» констатирует, что информационная асимметрия между эмитентами, организаторами размещения и розничными инвесторами является системной проблемой. Инвесторы принимают решения в условиях дефицита объективной информации о справедливой стоимости

компаний, а преобладание в открытом доступе (в том числе в социальных сетях) аналитических материалов рекламного характера не в полной мере обеспечивает профессиональную и объективную оценку перспектив развития эмитентов. В отдельных случаях наблюдается нацеленность на формирование завышенных ожиданий розничных инвесторов в преддверии публичного размещения [6]. Доклад содержит множество предложений регулятора по улучшению системы раскрытия информации при IPO и её адаптации для розничного инвестора.

В развитие доклада для общественных консультаций «Информационная прозрачность на рынке ценных бумаг» Банк России опубликовал отчет об итогах публичного обсуждения [7]. Документ фиксирует позицию регулятора после получения комментариев от участников рынка - эмитентов, инвесторов, организаторов размещений, саморегулируемых организаций и ассоциаций.

Банк России подтверждает необходимость системных изменений, направленных на устранение информационной асимметрии и защиту прав розничных инвесторов, но с учетом ряда компромиссов, выработанных в ходе дискуссии. Регулятор сохранил наиболее жесткие требования, несмотря на сопротивление части рынка: обязательные прогнозные показатели, независимые аналитические отчеты, ответственность организаторов размещения. Это свидетельствует о том, что проблема защиты прав инвесторов признается системной и требующей институциональных, а не косметических изменений.

Наиболее уязвимая категория - неквалифицированные инвесторы - стала главным бенефициаром новых требований. Адаптация резюме проспекта, прозрачная аллокация, доступ к аналитическим отчетам - все эти меры направлены на выравнивание информационного поля между розничными и институциональными инвесторами.

Банк России прямо увязывает предлагаемые изменения с необходимостью стимулирования долгосрочного инвестирования в акции российских компаний и сохранения уровня доверия и защиты инвесторов на рынке капитала. Без реализации этих мер, достижение целевых показателей капитализации (66–75% ВВП) и доли долгосрочных сбережений граждан (40–45%) будет затруднено.

Список литературы:

1. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. № 309 [Электронный ресурс] // Официальный сайт Президента России. — URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542/page/1 (дата обращения: 20.02.2026).
2. Валовой внутренний продукт Российской Федерации / Федеральная служба государственной статистики – [Интернет ресурс]: https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts (дата обращения: 04.03.2026).
3. Рыночная капитализация / Московская Биржа – [Интернет ресурс]: https://www.moex.com/s26 (дата обращения: 04.03.2026).
4. Публичные размещения и предложения акций: итоги 2024 года. Информационно-аналитический материал [Электронный ресурс] // Официальный сайт Банка России. — URL: https://cbr.ru/Collection/Collection/File/55526/IPO_review_2024.pdf (дата обращения: 08.03.2026).
5. Абрамов А. Е., Чернова М. И. IPO акций российских компаний: теория, индикаторы, тренды и перспективы // Финансовый журнал. 2024. Т. 16. № 6. С. 42–60.
6. Информационная прозрачность на рынке ценных бумаг: эмитенты и условия первичного размещения их акций. Доклад для общественных консультаций [Электронный ресурс] // Официальный сайт Банка России. — URL: https://www.cbr.ru/Content/Document/File/171925/Consultation_Paper_20012025.pdf (дата обращения: 08.03.2026).
7. Информационная прозрачность на рынке ценных бумаг: эмитенты и условия первичного размещения их акций. Отчет об итогах публичного обсуждения доклада для общественных консультаций [Электронный ресурс] // Официальный сайт Банка России. — URL: https://cbr.ru/Content/Document/File/178764/report_14072025.pdf (дата обращения: 08.03.2026).

ВЛИЯНИЕ СТУДЕНЧЕСКОГО ЯЗЫКОВОГО КЛУБА НА АКАДЕМИЧЕСКУЮ МОТИВАЦИЮ И КОММУНИКАТИВНОЕ РАЗВИТИЕ ОБУЧАЮЩИХСЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА (НА ПРИМЕРЕ КЛУБА «FOX VOX» САРФТИ НИЯУ МИФИ)

Самойлова П. С., Вихарева Ю. В., Ерунов Д. Н., Стародубцева Е.А.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В условиях глобализации и интернационализации профессиональной деятельности владение английским языком как lingua franca научно-технической сферы становится необходимым условием конкурентоспособности выпускника технического университета. Однако практика преподавания иностранного языка в неязыковом вузе сопряжена с рядом объективных трудностей: лимитированным объемом аудиторных часов, гетерогенностью исходного уровня языковой подготовки студентов, недостаточной интегрированностью профессионального контекста в учебные материалы. Одним из перспективных направлений преодоления указанных противоречий выступает вовлечение обучающихся в различные формы внеаудиторной деятельности, в частности – в работу студенческих языковых клубов [3; 4].

Цель настоящего исследования — эмпирическая верификация влияния участия в деятельности студенческого языкового клуба на академическую мотивацию, успеваемость и самооценку коммуникативного прогресса студентов технического вуза.

Теоретико-методологическую базу составили компетентностный (И.А. Зимняя, А.В. Хуторской), личностно-ориентированный (Е.В. Бондаревская, В.В. Сериков) и контекстный (А.А. Вербицкий) подходы. Эмпирическое исследование проводилось на базе студенческого клуба английского языка и культуры «Fox Vox» СарФТИ НИЯУ МИФИ. Выборку составили 46 участников клуба. Инструментарий – авторская анкета, включающая три содержательных блока: академическая мотивация, академические результаты, самооценка прогресса. Обработка данных осуществлялась методами дескриптивной статистики.

Психолого-педагогическая характеристика целевой аудитории. Возраст респондентов (17–19 лет) соответствует периоду поздней юности – ранней взрослости, сенситивному для формирования мировоззрения, ценностных ориентаций и профессионального самоопределения. Ведущими психологическими новообразованиями данного этапа выступают абстрактно-логическое мышление, потребность в автономии, рефлексия собственных способностей и выстраивание адекватной Я-концепции [2; 3]. Указанные особенности детерминировали отбор тематики заседаний клуба, ориентированной на экзистенциально значимые, профессионально релевантные и эмоциогенные проблемы. Организационно-содержательная модель клуба «Fox Vox». Основной вектор деятельности клуба – формирование иноязычной коммуникативной компетенции в единстве ее устной и письменной составляющих. Системообразующим фактором выступает воспитательно-направляющая функция преподавателя-куратора, реализуемая в парадигме педагогики понимания и фасилитации [3]. Деятельность клуба строится на принципах:

- полифункциональности (интеграция учебных, развивающих и воспитательных задач);
- субъектности (передача обучающимся организационно-содержательных полномочий);
- вариативности (ротация форматов: дискуссионный клуб, мастермайнд, презентационная сессия, проектный интенсив);
- событийности (придание встречам характера личностно значимого события).

Участники последовательно осваивают позиции модератора, спикера, оппонента, разработчика контента, что обеспечивает погружение в полимодальную коммуникативную среду. Зафиксировано, что смена деятельностных ролей коррелирует с редукцией языкового барьера, аккумуляцией опыта публичной презентации результатов интеллектуального труда и формированием навыков командного взаимодействия.

Блок 1. Академическая мотивация. Анкетирование зафиксировало статистически выраженную позитивную динамику мотивационных установок. 69,6% респондентов (32человек) констатировали возрастание субъективной привлекательности процесса изучения английского языка. 80% опрошенных (32 человек) отметили интенсификацию автономной учебной деятельности и редукцию языковой тревожности. Доля негативных ответов – 2,2% (1 респондент). Полученные данные корреспондируют с результатами исследований, фиксирующих корреляцию между включенностью во внеаудиторную коммуникативную практику и уровнем внутренней мотивации к овладению иностранным языком.

Блок 2. Академические результаты. 78,3% участников (36 человек) связали позитивную динамику экзаменационно-зачетных показателей по дисциплине «Иностранный язык» с деятельностью в клубе. Одновременно 52,2% респондентов не зафиксировали изменений в успеваемости по непрофильным дисциплинам, что позволяет квалифицировать влияние клуба как специфическое, локализованное предметным полем. 84,8% (39 человек) сообщили о редукции когнитивных усилий при выполнении домашних заданий и интенсификации понимания грамматического материала. 65,1% (30 человека) констатировали прогресс в развитии рецептивных аудитивных навыков.

Блок 3. Самооценка коммуникативного прогресса. Абсолютное большинство респондентов зафиксировали позитивную динамику субъективных параметров коммуникативной компетенции: уверенность в устной речи (более 60%), качество понимания иноязычных текстов (61, 4%), частота использования английского языка в повседневных коммуникативных практиках (76,1%). Императивный характер носит показатель сформированности пролонгированной учебной мотивации: 60,9% респондентов декларируют намерение продолжать изучение английского языка в постобразовательной перспективе.

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Деятельность студенческого языкового клуба «Fox Vox» представляет собой эффективную форму организации внеаудиторной иноязычной практики, интегрирующую лингводидактические, психолого-педагогические и воспитательные компоненты
2. Эмпирически верифицировано статистически значимое позитивное влияние включенности в клубную деятельность на:

- уровень внутренней мотивации к изучению иностранного языка (80% респондентов);
- академическую успеваемость по дисциплине (78%);
- развитие коммуникативных навыков в продуктивных и рецептивных видах речевой деятельности (говорение, аудирование, чтение формирование устойчивой установки на непрерывное языковое самообразование (60%).

3. Детерминантами результативности выступают: субъектная позиция обучающегося, вариативность деятельностных ролей, творческий характер активности, профессионально-контекстная насыщенность содержания, фасилитирующая позиция преподавателя.

Перспективы дальнейших исследований связаны с лонгитюдным изучением устойчивости сформированных мотивационных установок и коммуникативных компетенций, а также экстраполяцией апробированной модели на деятельность иноязычных студенческих объединений иных профильных направленностей [1].

Список литературы:

1. Вихарева Ю В. Формирование духовно нравственных и этических ценностей учащихся технических (неязыковых) вузов РФ на примере функционирования «Клуба любителей английского языка и культуры “Fox Vox”» (Саровский физико-технический институт национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Саров). М, 2019.
2. Михайлов Л. И. Социология культуры: Учебное пособие для ВУЗов. М., 1999.
3. Сенько Ю. В. Гуманитарные основы педагогического образования: Курс лекций: Учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений. М., 2000.
4. Фроловская М. Н. Педагогика понимания. М., 2007.

МЕТОД ЛИНЕАРИЗАЦИИ В ПОСТРОЕНИИ ДИАГРАММ ПОКУПАТЕЛЬСКОЙ СПОСОБНОСТИ С ОПОРОЙ НА АРХЕ-ПСИХОТИПИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ

Вдовкин А.Л., Коробов С.А., Конькова М.И.
Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В настоящее время наблюдается излишний формализм в обучении студентов математическим дисциплинам, что негативно влияет на междисциплинарные связи и влечёт низкий уровень корреляции полученных знаний с практическим их применением.

Достаточно долгое время данную проблему пытаются решить средствами цифровизиции и гуманитаризации научного знания, однако данные средства рассматриваются изолированно друг от друга, что существенно снижает эффективность их применения.

В данной работе мы попытаемся приблизиться к созданию универсального средства обучения, с возможностью дальнейшего применения в профессиональной деятельности, в основе которого лежит принцип «диалектического единства», в котором дисциплинарная диалектика представлена технической и гуманитарной областями научного знания, гуманитарный аспект здесь представляется психологией, а методическая диалектика формальным и образным аспектами обучения. Чтобы удовлетворить представленные выше требования воспользуемся методами математического моделирования.

В качестве дисциплины, в рамках которой будет осуществляться работа, выберем экономику, так как она наиболее гармонично соединяет в себе математический и психологический аспекты, а также имеет широкие возможности для математического моделирования.

Перейдём к описанию процесса рассуждений.

Психологический аспект в данной работе основан на архе-психотипических соотношениях, которые описывают личность человека с разных сторон.

За основу были взяты 4 типа темперамента по Гиппократу – флегматик, холерик, сангвиник, меланхолик. Они могут подразделяться на более полные и разносторонние типологии личности. В данной работе были рассмотрены и соотнесены наиболее распространённые 3 вида типологий, соответственно, по Юнгу, по Пирсону, по Егидесу. Скажем подробнее о каждой типологии.

К.Г. Юнг выделяет 8 типов личности человека (на диаграмме зелёным цветом), опираясь на принцип противоположностей:

Экстраверт противопоставляется интроверту;

Противопоставление по способу взаимодействия с окружающим миром (мысль/ощущение/чувство/интуиция – четырёхчастная психологическая антитеза)

К. Пирсон указывает на 12 архетипов личности человека (на диаграмме чёрным цветом), представляя архетип ролью человека в жизни, в определённый её период, которые он меняет с течением времени.

А.П. Егидес акцентирует внимание на 5 психотипах человека (на диаграмме малиновым цветом), которым присвоены названия психиатрических диагнозов – шизоид, эпилептоид, параноик, истероид, гипертим.

Соотнесём данные типологии личности на «плоскости темпераментов», взяв за основу аналог «тригонометрического круга», т.е. разделим круг на 4 сектора, где оси направлены по 4 типам темперамента.[1]

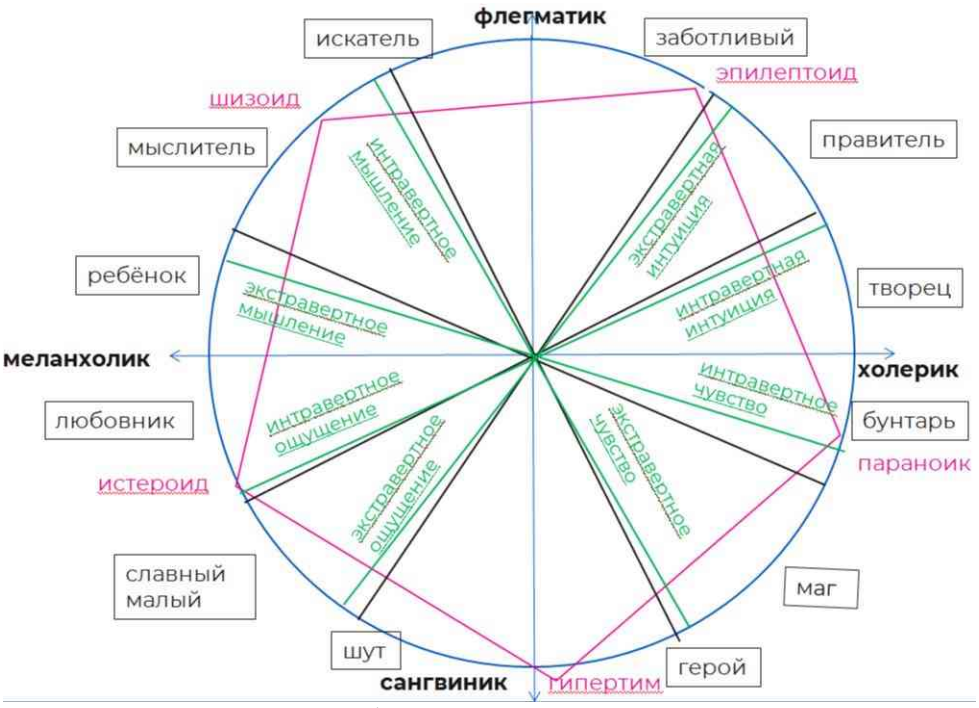


Рисунок 1 – Плоскость темпераментов

Теперь перейдём к математическому описанию диаграммы и отысканию ИПС (индекс покупательской способности), который в контексте данной работы характеризует способность человека к совершению трат и подверженность к воздействию рекламы.

Введём $\vec{T} = \begin{pmatrix} C \\ S \\ P \\ M \end{pmatrix}$ - вектор темперамента, где C = холерик, S = сангвиник, P = флегматик, M =меланхолик.

Построим вектор $\vec{T}$ на плоскости, основываясь на принципе «плоскостных весов», для этого введём вес психотипа (архетипа):

$t_j = \alpha_{0j} + \alpha_j a + \beta_j(m) + \gamma_j w + \varepsilon_j e + \delta_j s$, где α_{0j} – базовый вес, который подбирается таким образом, чтобы в зависимости от численных значений других коэффициентов вес был неотрицательным.

Векторы $\alpha_j, \beta_j(m), \gamma_j, \delta_j$ – связывают «эмпирические» параметры и архетипы, где a – параметр возраста (0;9) (берётся по десятилетиям, например от 0 до 10); $\beta_j(m)$ – параметр склада ума (0;1) (гуманитарный или технический), рассматривается одновременно как вектор, и как параметр по причине дуальности; w- параметр дохода (0;7) (например, от 50 до 100, от 100 до 500 тыс.руб. – до 10 млн.руб.); e – параметр образования (0;4) (от школы до вуза); s – параметр социального статуса (0;4) (вариативен).

Параметр j от 1 до 4 (по количеству векторов, $\beta_j(m)$ не участвует в пересчёте из-за дуальности параметров).

Далее введём $T_k = \sum_j t_j A_{jk}$ - итоговый вес темперамента = описание лепестковой диаграммы, где индекс k от 1 до 4 (по количеству типов темперамента), а так же матрица A_{jk} - состоит из столбов $\alpha_j, \beta_j(m), \gamma_j, \delta_j$, имеет размерность 4 на 4.

Получив формулу для лепестковой диаграммы по 4-ём осям (C = холерик, S = сангвиник, P = флегматик, M = меланхолик), получим:

$P = (\vec{T}; \vec{\sigma}) = \sum_k T_k \sigma_k$ - интегральный показатель покупательской способности, где $\vec{\sigma}$ - ***вес для темпераментов***, основываясь на свойствах типов темперамента и **нормировав на 1** получим коэффициенты, **0.73 – холерик, 0.55 – сангвиник, 0.37 – флегматик, 0.18 – меланхолик.**

$$P = 0{,}73 \cdot T(\text{холерик}) + 0{,}55 \cdot T(\text{сангвиник}) + 0{,}37 \cdot T(\text{флегматик}) + 0{,}18 \cdot T(\text{меланхолик})$$

Используя одно из средств графической визуализации, в данном случае в программе Matlab, и начальные навыки программирования строим лепестковую диаграмму и получаем нтегральный показатель покупательской способности.

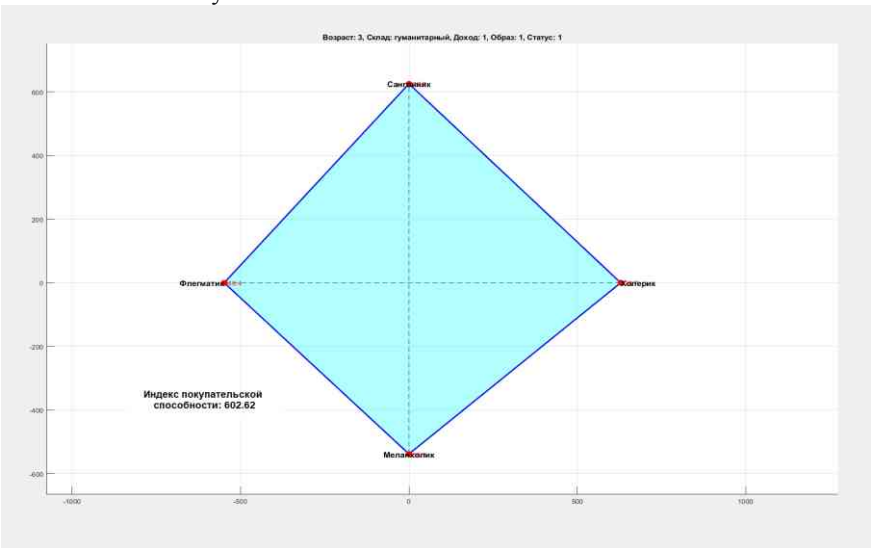


Рисунок 2 – Полученный результат

Индекс покупательской способности = 602,62.

Отметим, что индекс покупательской способности для среднестатистического человека, без каких-либо отклонений лежит в пределах от 550 до 750.

Переходя к выводам скажем, что представленные аналитические формулы решают не только учебные, но и междисциплинарные задачи. Они позволяют объединить гуманитарное знание с формальными методами, укрепляя связь вуза с предприятием и создавая основу для наукоёмкого наставничества.

Список литературы:
1. Суздалева Г.Р., Балескова А.Д. АНАЛИЗ ПСИХОТИПОВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ МАРКЕТИНГОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ // Естественно-гуманитарные исследования 2022. №1. С. 309-319.

ПЛАНИРОВАНИЕ ФИНАНСОВО – ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СарФТИ НИЯУ МИФИ

Шишкова А.С.[1], Аникина М.П.[2]
[1]Нижегородского государственного педагогического университета имени Козьмы Минина, г. Нижний Новгород
[2]Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В современных условиях развития экономики и ужесточения требований к эффективности распределения бюджетных средств, планирование финансово – хозяйственной деятельности высших образовательных организаций принимает характер ключевого инструмента стратегического управления. Для обеспечения финансовой эффективности каждому вузу необходимо ежегодно составлять план финансово – хозяйственной деятельности [3].

В Саровском физико – техническом институте (далее – СарФТИ НИЯУ МИФИ) подготовкой плана занимается планово – экономический отдел. В связи со статусом образовательного учреждения в качестве обособленного подразделения НИЯУ МИФИ в процесс включаются два этапа: после заполнения плана в Электронном бюджете проводится его утверждение головной площадкой, далее данные подтверждаются руководителем филиала и аккумулируются финансовыми службами НИЯУ МИФИ в единый план. Утверждение полученного документа проводится учредителем университета – Министерством науки и высшего образования.

Форма плана финансово – хозяйственной деятельности высших учебных заведений утверждена Приказом Министерства финансов России от 31.08.2018 №186н. Изучив структуру плана ФХД и методику его составления, мы предлагаем внести следующие изменения [1]:

1. Внести в форму плана ПФХД в строках номер 1230, 1720, 2630 детализацию статей поступления и расходования средств, которые они включают в себя;
2. Детализировать источники средств по строкам 1200, 1430, 1500, 2110, 2210, 2230, 2240;
3. Ежегодно проводить Мониторинг – ПФХД, который позволит проанализировать финансовое состояние вуза;
4. Проводить на основании ПФХД оценку инвестиционной привлекательности и эффективности вуза.

Предложенная корректировка формы плана ФХД позволит более детально изучить основные статьи распределения средств института, что отразит специфику вуза и наиболее детально проиллюстрирует основные виды деятельности, от которых учебное заведение получает наибольший доход и в основном затрачивает ресурсы. Источники поступления, такие как субсидии на выполнение государственного (муниципального) задания, целевая субсидия, средства от приносящей доход деятельности, также отразят уровень автономности организации от средств бюджета, что является одним из основных показателей эффективности финансовой деятельности учебного заведения.

На основании данных изменений становится возможным проведение предложенного нами Мониторинга – ПФХД, представленным в таблице 1.

Таблица 1: Показатели для проведения Мониторинга – ПФХД [4]

N п/п	Наименование показателя эффективности	Оценочные значения выполнения показателей	Кол-во баллов	Методика расчета
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1	Объём средств, полученных из Федерального бюджета в рамках субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания в общих объёмах доходов учебной организации	менее 50%	4	(стр.1700 КВР 510+ стр. 2230 КВР 340) / (стр.1000+1700)
		50-59%	10	
		более 60%	7	
1	*2*	*3*	*4*	*5*
2	Объём внебюджетных средств, полученных от приносящей доход деятельности, в общих объёмах доходов учебной организации	менее 50%	4	(стр.1000 (ПД)+стр. 1700 (ПД))/(стр.1000+ 1700)
		50-55%	10	
		более 56%	7	
3	Объём доходов от выполнения научно-исследовательских работ в общем объёме средств, полученных от оказания работ, компенсации затрат учреждения	менее 20%	0	стр.1220 КВР 130 /стр. 1200 КВР 130
		35-39%	3	
		40-44%	5	
		более 45%	1	
4	Объём расходов образовательной организации на оплату труда в общем объёме выплат учреждения	менее 35%	6	стр. 2110 КВР 111 / 2000
		35-49%	8	
		60-69%	10	
		более 70%	1	
5	Объем средств, потраченных на финансирование выполнения государственного задания из средств Федерального бюджета в общем объёме затрат	менее 30%	2	стр. 2000 (субсидии) / стр. 2000 (сумма)
		40-49%	8	
		более 50%	5	
6	Объём средств, полученных из Федерального бюджета в рамках финансирования стипендиального фонда в общей сумме средств на выплату стипендий	менее 50%	5	стр. 2230 КВР 340/стр. 2230 КВР 340 (сумма)
		50-89%	7	
		более 90%	1	
7	Объём расходов на закупку товаров, работи, услуг в общем объёме расходов	менее 30%	5	стр.2600/(стр. 2000+стр.4000)
		30-49%	4	
		более 50%	2	
8	Остаток средств на конец отчетного года	менее 5%	2	стр. 02/(стр.1000+стр .1700)
		5-5,5%	5	
		более 5,5%	0	

На основании данной таблицы учредитель и сама организация высшего образования сможет детально проанализировать финансовое состояние, выявить наиболее сильные и слабые места обеспеченности вуза. По результатам итоговых значений за год мы предлагаем проведение оценки инвестиционной привлекательности и эффективности деятельности вуза по следующим показателям: выручка от деятельности, выручка от реализации продукции, себестоимость продукции (рассчитывается по значениям базовых нормативных затрат на высшее обучение), амортизация основных средств и нематериальных активов, EBITDA, темп роста чистой прибыли, темпы роста выручки, объём доходов организации на одного студента и фондовооруженность.

Предложенные показатели необходимы для проведения самоанализа учебного заведения на рынке, корректировки инновационно – инвестиционных процессов в вузе, разработки стратегии развития вуза на любом уровне и оценки наиболее важных факторов, влияющих на привлекательность образовательной организации. На основании предложенных расчетов может быть сформирован имидж образовательной организации на рынке образовательных программ. Современное перспективное образовательное учреждение,

отвечающее требованиям, предъявляемым работодателями, занимающее высшие позиции в рейтингах – получает инвестиции почти из всех уровней бюджетов, внебюджетных источников, которые направляются на создание базы и условий для подготовки высококвалифицированных адаптированных к работе на предприятиях молодых специалистов. В целом, данные значения формируют один из основных показателей мониторинга эффективности вузов – финансово – хозяйственная деятельность.

Таким образом, процесс составления плана финансово – хозяйственной деятельности любого вуза является неотъемлемой частью его существования. На основании данного документа становится возможным спрогнозировать вероятные изменения, как во внешней среде существования организации, так и внутри нее. Модернизация плана ФХД позволит обеспечить наиболее точное и наглядное понимание деятельности вуза и эффективность использования имеющихся денежных средств.

Список литературы:

1. Приказ Министерства финансов Российской Федерации от 31 августа 2018 г. N 186н «О требованиях к составлению и утверждению плана финансово-хозяйственной деятельности государственного (муниципального) учреждения», [Электронный ресурс] // Режим доступа. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_308988/?ysclid=mn2re9o2w4362499213 – Дата обращения 23.03.2026;
2. Приказ Министерства финансов Российской Федерации от 17 августа 2020 г. N 168н «Об утверждении порядка составления и ведения планов финансово-хозяйственной деятельности федеральных бюджетных и автономных учреждений», [Электронный ресурс] // Режим доступа. URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=492241&ysclid=mn2rig5qhs397881646 – Дата обращения 23.03.2026;
3. Внутрифирменное планирование: учебник и практикум для вузов/ С.Н. Кукушкин [и др.]; под редакцией С.Н. Кукушкина, В.Я. Позднякова, Е.С. Васильевой. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2026. – 344с. – (Высшее образование). – Текст: непосредственный. ISBN 978-5-534-13526-8;
4. План финансово-хозяйственной деятельности Саровского физико-технического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» на 2025 г. (на 2025 г. и плановый период 2026 и 2027 годов, [Электронный ресурс] // Режим доступа. URL: https://sarfti.ru/sveden/files/003506.pdf – Дата обращения 23.03.2026.

НЕЧЁТКАЯ ЛОГИКА В ОЦЕНКЕ «КАЧЕСТВА ЖИЗНИ»: ИНТЕГРАЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ ИНДИКАТОРОВ

Марагина В.Ю., Самохвалова А.Д.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ г. Саров

В настоящее время при определении уровня развития общества (страны) широко используются различные индексы: человеческого развития, качества жизни, устойчивого развития и т. д. Вместе с тем каждому из них присущ ряд недостатков, так как они не могут рассматриваться всеохватывающие, всеобъемлющие индексы, поскольку полученные с их помощью данные нуждаются в более глубокой детализации на базе дополнительной статистической информации о стране, её особенностях и проблемах.

Социетальная система (социетальная общность) — это система общественных отношений и процессов в обществе, рассматриваемых на уровне общества в целом.

Для моделирования социентальной системы нами исследуются экономическая и социальная среды обитания. Эти среды взаимосвязаны, и их функционирующие результаты определяют социальное развитие общества (страны). Социальная система состоит из следующих составляющих [3]:

1. Экономическая среда, она характеризует темп роста ВВП; ВВП на душу населения; уровень инфляции; долю импортных продуктов в потреблении; долю высокотехнологичной продукции в экспорте; финансовую стабильность; бизнес-среду. Выходным параметром этой подсистемы является индекс качества экономической среды;

2. Социальная среда, она включает такие показатели, как продолжительность жизни населения; дециль - соотношение между доходом 10% наиболее богатого населения и доходом 10% наиболее бедного населения; уровень безработицы; отношение числа умерших к числу родившихся; расходы на образование; здравоохранение; культуру и науку; среднемесячная заработная плата; государственные пенсионные расходы; уровень бедности. Выходным параметром подсистемы является индекс качества социальной среды.

Интеграция экономических и социальных индикаторов в оценке качества жизни с использованием нечёткой логики — это подход, который позволяет учитывать многообразие факторов и их нелинейные взаимосвязи, а также включать качественные факторы, трудно поддающиеся формализации в традиционных моделях [4].

Актуальность темы исследования. Вопросы исследования качества жизни населения и его измерение представляются одними из наиболее актуальных, потому что они связаны с приоритетным направлением социально-экономического оздоровления страны. В Конституции Российской Федерации закреплено, что одним из основополагающих принципов функционирования общества является построение социального государства, а задача обеспечения достойной жизни каждому человеку является обязанностью общегосударственной политики [5].

Проблема анализа качества жизни, этому посвящено большое количество работ, но несмотря на высокий научный интерес, к настоящему времени не сложилось единого взгляда на оценку качества жизни, а также общепризнанных подходов к его определению. Наиболее информативным является исследование качества жизни в комплексе объективных и субъективных параметров, изменяющихся во времени, поскольку установки субъекта не являются постоянными: они меняются со временем и опытом (утверждение принадлежит авторам научной статьи *«Динамические суждения о связанном со здоровьем качестве жизни на основе метода анализа иерархий»* (2023) — М. П. Дьякович и И. А. Финогенко.). Сложность данной задачи обуславливает необходимость создания адекватных математических методов, алгоритмов, программных и инструментальных средств, которые позволят по ряду критериев оценить уровень субъективной удовлетворенности граждан своим личным положением и рассчитать отдельные статистические показатели.

Следует отметить недостаточную разработанность таких принципиальных вопросов, как построение оценок количественных и качественных показателей качества жизни населения с использованием многоуровневых нечетких описаний, анализ динамических характеристик показателей, формирующих интегральную оценку качества жизни.

Цель исследования: оценка качества жизни населения на основе анализа динамических нечетких моделей, учитывающих динамику изменения социально-экономических показателей.

Объектом исследования являются экономически обособленные регионы (субъекты РФ), эффективность развития которых может быть оценена в результате социально-экономического взаимодействия групп населения с различающимся уровнем качества жизни.

Предметом исследования являются социально-экономические процессы, на основе комплексной оценки которых формируются знания о многокомпонентной субъектно-объектной структуре качества жизни населения территории.

Использование нечеткой логики в оценке «качества жизни» населения, некоторые примеры:

1. Исследование Республики Башкортостан. Предлагалось использовать аппарат нечёткой логики для описания параметров уровня жизни населения. В модели учитывались возраст, разница между желаемым и фактическим уровнем зарплаты, уровень образования. Выходной переменной была «желаемый уровень жизни». [2]
2. Исследование Волгоградской области. Разработана методика оценки качества жизни населения на основе динамических нечётких моделей. В исследовании применялись данные региональной статистики Волгоградской области А. В. Костиковой в 2014 году.

Важной особенностью современных подходов к качеству жизни является положение о том, что оно имеет две стороны: объективную и субъективную (психологическую).

Объективная сторона определяется комбинацией различных нормативных и статистических характеристик, с помощью которых можно объективно судить о степени удовлетворения научно обоснованных потребностей и интересов людей. **Субъективная** связана с тем, что потребности и интересы конкретных людей всегда индивидуальны и отражаются в субъективных ощущениях индивидов, их личных мнениях и оценках. Отсюда - необходимость

учета специфики переживаний каждым отдельным человеком степени удовлетворенности процессом и результатами его жизни [1].

Научная новизна состоит в развитии математического аппарата и адаптации методики динамического нечеткого моделирования для оценки качества жизни населения. Наиболее существенные научные результаты:

1. Обоснованы требования, предъявляемые к методу аналитико-экспертного оценивания качества жизни населения региона, позволяющему учесть динамические описания социально-экономических показателей, составляющих комплексную оценку и отсутствующие в используемых в настоящее время методиках оценки качества жизни населения;
2. Предложена концепция динамических нечетких моделей, применение которых позволит учитывать не только численные и статистические данные, но и неформализованные знания об объектах социально-экономических систем, изменяющиеся во времени, что обеспечит преодоление ограничений методов многокритериальной оценки объектов сложных систем, связанных с допущением применения статичных экспертных суждений при описании динамических свойств объектов и повышение достоверности получаемых результатов в процессе оценивания динамического состояния экономических объектов;
3. Разработаны структура процесса и алгоритм построения динамических нечетких множеств и соответствующих им динамических функций принадлежности, позволяющих наглядно отображать функциональную зависимость в пространстве «время – это степень принадлежности - показатель» при формировании лингвистических описаний кластерного распределения интервалов значений показателей, что обеспечивает определение оценочных уровней показателей в динамической среде.

При этом структура показателей качества жизни населения имеет следующий вид [6]:

1. Финансово-экономические показатели (национальное богатство доходы и расходы населения, цены и инфляция). Национальное богатство в расчете на душу населения, если его рассчитать, как сумму капитализированной стоимости и прибавочного продукта, является одним из главных сравнительных показателей. Уровень доходов (т.е. уровень жизни) населения включает совокупность показателей, характеризующих денежные до ходы на душу населения из различных источников, стоимость и структуру прожиточного минимума, а также объем валового внутреннего продукта и внешнего долга на душу населения.

2. Медико-экологические показатели (здоровье и медицина, питание населения, физкультура и туризм, экология и окружающая среда, семья). Они характеризуют жизнедеятельность, экологию и здоровье населения. Данная группа показателей свидетельствует о «здоровье нации» (через демографические показатели средней продолжительности жизни, рождаемости, смертности, заболеваемости), о расходах на здравоохранение и физкультуру.

3. Показатели материального благосостояния (труд и занятость, жилье и коммунальное хозяйство, транспорт и связь, торговля и бытовое обслуживание, НТП и производство). Эта группа показателей отражает уровень занятости и степень удовлетворения потребностей населения в товарах, а также развитие производительных сил в отраслях экономики, ориентированных на производство предметов потребления. Они характеризуют условия жизни населения в виде обеспеченности жильем на душу населения, наличия товаров. длительного пользования.

4. Показатели духовного благосостояния (образование, культура, социальное обеспечение, личная безопасность и преступность, политика и общественная деятельность). Данные показатели характеризуют социальную жизнь общества и удовлетворение духовных потребностей на основе оценки уровня образования, культуры, науки, социальной жизни, доверия к властям, преступности, состояния семьи.

Структура качества жизни базируется на трех компонентах:

1. удовлетворении потребностей населения: трудовых, социальных, семейно-духовных;
2. условиях жизни, включающих характеристики социальной среды, состояния природной и искусственной среды («второй природы»), созданной человеком;
3. видах деятельности, осуществляемых человеком, и включающих, прежде всего труд, быт, отдых и др.

Таким образом нечеткая логика позволяет более гибко и реалистично оценить качество жизни, чем традиционные методы, благодаря лингвистическим переменным (например, «удовлетворительно», «высокий уровень», «низкий уровень»), учитывать динамику показателей и сочетать объективные статистические данные с субъективными оценками. Это помогает создавать интегральные показатели, которые показывают сложную взаимосвязь

экономических (доходы, занятость, налоги) и социальных (здоровье, образование, безопасность) факторов.

Список литературы:

1. Лебедева, А.А., Леонтьев, Д.А. (2022). Современные подходы к изучению качества жизни: от объективных контекстов к субъективным. Социальная психология и общество, 13(4), 142-162. https://doi.org/10.17759/sps.2022130409
2. Низамутдинов М.М, Ахметзянова М.И. Нечёткие алгоритмы принятия решений в многоагентной модели оценки взаимовлияния миграционной активности населения и экономического развития региона / Низамутдинов М.М., Ахметзянова М.И. // Известия Уфимского научного центра РАН. - 2025. - № 3. С. 124-130.
3. Иманов К.Д., Акперов Р.М. Оценка индексов качества социальной и экономической системы с использованием нечёткой логики. / Иманов К.Д., Акперов Р.М. // КиберЛенинка ЭНСР № 4 (59) – 2012 – С. 109-115.
4. Смирнов М. Ю. К вопросу о мониторинге социально-экономического развития региона в контексте состояния инновационного климата и институциональной трансформации. / М. Ю. Смирнов // Экономика, предпринимательство и право. – 2025. – Т. 15, № 5. – С. 3539-3556. https://1economic.ru/lib/123004
5. Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право 2015 год, №2 / [Электронный ресурс] // Лань. [сайт]. — URL: https://e.lanbook.com/journal/issue/302248
6. Интегральный показатель качества жизни населения. Абсолютная численность населения / [Электронный ресурс] // Студопедия: [сайт]. — URL: https://studopedia.ru/19_294310_integralniy-pokazatel-kachestva-zhizni-naseleniya-absolyutnaya-chislennost-naseleniya.html?ysclid=mn4lnwbpbe95335513

ОПК КАК ДРАЙВЕР РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ

Стадник В. В.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ г. Саров

В 2026 году запланированные расходы федерального бюджета Российской Федерации по статье «национальная оборона» составляют немногим более 12 трлн. рублей при общих расходах бюджета в 44 трлн. Столь высокая доля расходов на одну статью хорошо показывает направление вектора внутренних и внешних интересов нашего государства. В обществе данная новость часто воспринимается как будущий крах российской экономики и ее полная милитаризация. В рамках данной работы исследуется вопрос о роли предприятий оборонно-промышленного комплекса в развитии экономики России.

Прежде чем говорить об ОПК как о факторе развития, стоит определить структуру и основные механизмы работы оборонно-промышленного комплекса России. Основным документом, определяющим развитие данного сектора является программа «Развитие оборонно-промышленного комплекса», утверждаемая правительством России. Сам документ защищается государственной тайной, однако в статистике федерального бюджета отражена общая сумма, выделяемая по данной программе: 11 320 150 тыс. рублей на 2026 год [1]. Возникает резонный вопрос: если на программу развития ОПК выделено порядка 11,5 млрд рублей, то о каких триллионах говорилось в начале работы. Нужно понимать, что ОПК и национальная оборона максимально тесно связаны - нацоборона через государственную программу вооружений создает заказ и оплачивает его исполнение из озвученного триллионного бюджета для предприятий ОПК.

Эти два документа (ГПВ и ГП ОПК) постоянно согласуются между собой, чтобы избежать перепроизводства или наоборот недостатка производственных мощностей.

Интересной особенностью сектора является сложность движения финансов из средств, направленных на национальную оборону на счета предприятий ОПК. Так как политика цен в ГОЗ должна строго контролироваться, предприятия работают через казначейское сопровождение, а сами деньги идут на специальные счета, а не сразу на расчетные. Такая схема позволяет государству видеть всю цепочку движений денежных средств, но осложняет работу самих предприятий в вопросе отчетности. Тема исполнения ГОЗ с бухгалтерской точки зрения является крайне интересной и достойна отдельной работы, но в рамках данной статьи примем за факт некоторые сложности взаимодействия государства и предприятий ОПК в вопросах

денежных средств и отчетности. Опустим в этой работе и вопросы, касающиеся различных субсидий из федерального бюджета.

Основным регулятором гражданской и оборонной промышленности является Минпромторг России (порядка 80% предприятий), другая часть предприятий регулируется ГК «Роскосмос», Минобороны России, ГК Росатом и другими организациями. Большинство активов государства консолидировано в крупные интегрированные структуры – ГК «Ростех», ГК «Росатом», ГК «Роскосмос» [2]. Отдельно здесь стоит отметить ГК «Ростех» - флагман ОПК, который объединяет небезызвестные холдинги: «Калашников», «Швабе», «Высокоточные комплексы», «ОАК» и многие другие. Холдинги в свою очередь объединяют под своим руководством отдельные предприятия, конструкторские бюро, НПО, НИИ.

После начала СВО Россия оказалась под беспрецедентный количеством санкций, что привело к снижению темпа роста ВВП в 2022 году до значений в -2,1%. Однако, несмотря на увеличивающееся экономическое давление, в следующем 2023 году темп роста ВВП составил 3,5%, а инфляция снизилась на 4.4% [3]. Тенденция по сохранению темпов роста ВВП и снижения уровня инфляции продолжается и сейчас, что хорошо видно в документах Министерства финансов России [4].

Выполнение резко возросшего ГОЗ подтолкнуло промышленность к росту и внесло значительный вклад в увеличение всей российской экономики. Изменилась структура экономики: больший акцент стал делаться на развитие обрабатывающей и высокотехнологичной промышленности, уменьшая долю сырьевой экономики, помогая снять Россию с «нефтяной иглы» [5].

Главным фактором развития экономики России, которому способствует ОПК, является мультипликативный эффект. По оценкам экспертов ИНП РАН он составляет 0.7-0.8. Это означает, что на каждый рубль роста производства в оборонной сфере экономика получает дополнительно 70-80 копеек дополнительных доходов в смежных секторах. ОПК стимулирует металлургию, станкостроение, химическую промышленность, микроэлектронную промышленность, транспорт и даже IT.

ОПК является наиболее наукоемким и высокотехнологичным сектором российской экономики. С учетом санкционной политики все больше внимания уделяется вопросам импортозамещения критически важных технологий отечественными аналогами. Доля затрат на научные исследования и разработки в структуре себестоимости продукции в ОПК значительно выше чем в других областях. Традиционно, военные разработки в дальнейшем становятся основой для гражданских инноваций.

Можно сказать, что ОПК стал локомотивом роста заработных плат в стране. После 2022 года произошел резкий скачок в зарплатах на предприятиях, исполняющих гособоронзаказ (на 20-25% выше среднего по стране). Начался переток рабочей силы - порядка 500 тыс. человек за 2 года. В январе 2026 года на совещании с президентом была озвучена цифра в 3 800 000 человек, работающих в ОПК. Подобный перекос безусловно может иметь негативные последствия, поэтому в 2025 году зарплатная гонка остановилась и экономика начала адаптироваться к новой реальности, где повышенные зарплаты остаются только для высококвалифицированных специалистов.

Ведется активное сотрудничество предприятий ОПК с вузами: ГК «Ростех» выступила инициатором создания Совета опорных научно-образовательных организаций, куда вошли ведущие ВУЗы страны. Система «школа-вуз-предприятие» активно реализуется и обеспечивает кадрами отрасль.

Предприятия ОПК также ежегодно наращивают долю производимой гражданской продукции. По заявлениям первого вице-премьера Дениса Мантурова доля гражданской продукции на предприятиях ОПК превысила 30%. В частности, это касается современного железнодорожного транспорта, строительно-дорожной техники, медицинской техники, фармацевтики, бытовой электроники и телеком-устройств. Планируется дальнейшее увеличение роли ОПК в реализации проектов технологического лидерства и национальных проектов в этой области [6]. Подобная активность может говорить о том, что с окончанием СВО российский сегмент военной экономики не схлопнется, а плавно перейдет на «мирные рельсы» с сохранением некоторой доли военного производства, необходимой для поддержания обороноспособности страны.

Таким образом можно утверждать, что расходы федерального бюджета на национальную оборону обеспечивают не только военное преимущество нашей страны, но и

помогает развивать экономику России в условиях внешних санкций и общей сложности макроэкономической ситуации в стране.

Список литературы:

1. О федеральном бюджете на 2026 год и на плановый период 2027 и 2028 годов. Федеральный закон от 28.11.2025 г. №426-ФЗ // КонсультантПлюс : справочно-правовая система : сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_520057/
2. Пронин А. Ю. диверсификация оборонно-промышленного комплекса - инновационный путь развития экономики России // Экономика и бизнес: теория и практика. 2020. №11-3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/diversifikatsiya-oboronno-promyshlennogo-kompleksa-innovatsionnyy-put-razvitiya-ekonomiki-rossii (дата обращения: 28.03.2026).
3. Бюджет для граждан к федеральному закону о федеральном бюджете на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов. М.: Минфин России, 2023. Электронная копия доступна на сайте https://minfin.gov.ru/ URL: https://minfin.gov.ru/ru/perfomance/budget/process/utverzhdenie/budget_citizen?id_65=305631-byudzhet_dlya_grazhdan_k_federalnomu_zakonu_o_federalnom_byudzhete_na_2024_god_i_na_planovyi_period_2025_i_2026_godov дата обращения: (28.03.2026).
4. Бюджет для граждан 2026–2028 к федеральному закону о федеральном бюджете на 2026 год и на плановый период 2027 и 2028 годов. М.: Минфин России, 2025. Электронная копия доступна на сайте https://minfin.gov.ru/ URL: https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2025/12/main/BDG_2026.pdf (дата обращения: (28.03.2026).
5. Юренков И. Н. Оборонно-промышленный комплекс как фактор социально-экономического роста // Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Социология. Политология. 2024. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/oboronno-promyshlennyy-kompleks-kak-faktor-sotsialno-ekonomicheskogo-rosta (дата обращения: 28.03.2026).
6. Встреча с Первым заместителем Председателя Правительства Денисом Мантуровым [Электронный ресурс] // Официальный сайт Президента России. 12 января 2026. URL: http://kremlin.ru/events/president/news/79001 (дата обращения: 28.03.2026).

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РОССИЙСКУЮ ЭКОНОМИКУ

Стадник В.В.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ г. Саров

Рекорды, которые ставят нейросети, перестали удивлять нас на регулярной основе. Мы относимся к этой технологии как к чему-то естественному и понятному, что приводит к тому, что искусственный интеллект заполняет все сферы нашей жизни, включая экономику. Влияние этой технологии легко рассмотреть в росте стоимости компаний, связанных с производством специализированных компонентов. Стоимость акций компании «Nvidia», крупнейшего разработчика графических процессоров и систем на чипе (основных компонентов функционирования ИИ технологий), с 2022 года выросла больше чем на 900% процентов, а компания возглавила список компаний с наибольшей рыночной капитализацией. Вышесказанное отражает значимость темы искусственного интеллекта и ее актуальность в современном мире. В рамках же данной работы изучается как ИИ был интегрирован именно в российскую экономику и какие проблемы стоят на пути дальнейшего углубления использования данной технологии.

Определим сферы, в которых наиболее применимы нейросети. Очевидно, что технология получила наибольшее распространение у компаний, деятельность которых связана с обработкой больших объемов данных: обработка визуальных данных (60% от числа организаций, использующих ИИ в 2024 году), интеллектуальная поддержка принятия решений и управление (50%), обработкой звуковых данных (36%), обработка текста (36%) [1]. Общая статистика по России гласит хоть и имеет небольшие расхождения, но позволяет утверждать, что практически две трети российских компаний используют ИИ в операционной деятельности или применяют генеративные нейросети в своей работе. Лидерами по использованию этой технологии стали финансовый сектор, сфера информационно-коммуникационных технологий и топливно-энергетический комплекс.

Подобный состав авангарда использования ИИ по сферам неудивителен: каждая из них требует обработки большого массива данных, а также выявления связей между различными факторами для корректного принятия решения. Подобные преимущества помогают снизить потребность в дополнительных сотрудниках, а также сократить количество ошибок, связанных с человеческим фактором.

Рассмотрим детальнее некоторые конкретные сферы, а также выделим основные проблемы развития технологии искусственного интеллекта в них.

Ретейл.

В ретейле нейросети предоставляют преимущество в задачах, связанных с персонализацией предложений для конкретного покупателя. Также большую роль играет возможность генерации контента (видео, изображения, текст), которая значительно оптимизирует трудовые ресурсы, затрачиваемые на рекламу. Создание чат ботов с использованием языковых моделей позволяет уменьшить время, теряемое сотрудниками клиентского сервиса при ответе на однотипные вопросы, и уделить его более детальному решению сложных индивидуальных запросов клиентов.

В качестве эффективного примера применения искусственного интеллекта можно привести сервисы компании «Яндекс», где нейросети интегрированы в систему динамического ценообразования, позволяя адаптировать стоимость товаров и доставки в зависимости от текущего спроса, времени суток, дорожной ситуации и погодных условий.

Проблемы.

Интеграция искусственного интеллекта требует больших затрат [2], что ограничивает возможности малого и среднего бизнеса в России использовать его. Создание инфраструктуры (серверные мощности, специализированные платформы на GPU, системы для сбора и обработки данных для анализа) в условиях высокой стоимости заемных средств практически исключает подобные инновационные проекты для МСП. Важно отметить, что большая часть проблем может быть решена с использованием сторонних (облачных) мощностей, но после ухода западных компаний из России остро стоит вопрос о доверии облачным технологиям для критически важных систем.

Организационная неготовность. Наблюдается неготовность руководства компаний делегировать нейросетям право принятия решений; ИИ воспринимается лишь как вспомогательный инструмент. Преодоление данного порога недоверия является необходимым условием для глубокой интеграции технологии.

Для некоторых компаний, занимающихся ретейлом в России, все еще открыт вопрос базовой цифровизации и говорить о внедрении сложной нейросетевой технологии не имеет никакого смысла [3].

На рынке труда наблюдается острая нехватка квалифицированных кадров, обладающих одновременно компетенциями в области создания и обучения нейросетей и пониманием специфики ретейла. Существующие специалисты преимущественно сконцентрированы в крупных рыночных игроках.

Нейросети подвержены ошибкам, а высокая сложность моделей затрудняет анализ причин принятия тех или иных решений, что превращает использование технологии в «игру вслепую» и несет в себе очевидные риски для бизнеса.

Финансовая сфера.

Финансовый сектор является одним из самых технологичных не только в рамках нашей страны, но и на мировом уровне. Масштабные базы клиентских данных стали толчком к быстрому внедрению ИИ в операционную деятельность [4]. Наибольшее распространение нейросетевые технологии получили в сферах страхования и риск-менеджмента, где требуется оценка множества разнородных факторов, а также в биржевой торговле — для анализа рыночных трендов, выявления взаимосвязей и диверсификации портфелей [5]. роме того, ИИ применяется финансовыми институтами для автоматизации взаимодействия с клиентами и дерутинизации рабочих процессов.

За примерами применимости ИИ технологий для финансовых компаний в России далеко ходить не надо: зайдите в приложение любого банка. Чат поддержки начинается с общения с роботом-ассистентом, рекомендации для каждого клиента подобраны с помощью анализа данных об операциях конкретного владельца счета. Крупные банки предлагают услуги доверительного инвестирования, которым будут заниматься нейросети или сотрудники, использующие их для анализа рынка.

Проблемы.

Финансовый сектор также сталкивается с проблемами интеграции ИИ, которые были озвучены ранее. Вопросы затрат, персонала, доверия к системе открыты и требуют аккуратности при использовании нейросетевых технологий.

Ошибки, допущенные нейросетями в банковской или инвестиционной деятельности, способны спровоцировать кризисные явления не только в рамках отдельной организации, но и в масштабах всего сектора экономики. В настоящее время законодательство не определяет субъекта ответственности за подобные гипотетические инциденты. Для финансового сектора ИИ является крайне важным инструментом для работы, опыт интеграции которого используют в дальнейшем другие организации по всей стране, поэтому важно четко регулировать использование этой технологии как самой компанией, так и государством.

Использование искусственного интеллекта также приводит к снижению потребности в работниках, выполняющих рутинную работу – клиентские менеджеры, специалисты трейдинга, страховые агенты. Широкое использование технологии приведет к массовому сокращению рабочих мест и росту безработицы [4]. Данная проблема относится не только к финансовому сектору, она применима к любой сфере, где ИИ выполняет функции работника, то есть способен полностью его заменить.

Промышленность.

Нейросетевые технологии являются важной частью развития промышленного сектора экономики России. Ключевым преимуществом их использования является возможность полной автоматизации производственного цикла и сокращения затрат трудовых ресурсов на единицу продукции. Ярким примером служат технологии компьютерного зрения, применяемые различными производствами для управления роботизированными линиями [6]. Также вопросы организации производства могут переложены на плечи искусственного интеллекта.

Проблемы.

Озвученные для других сфер проблемы также актуальны и для промышленности. Индивидуальной особенностью сектора можно назвать проблему неравномерности доступа к ресурсам. Лидерами в этой области являются корпорации, занятые исполнением государственного заказа или вообще являющиеся предприятиями, входящими в состав государственных корпораций, в частности, предприятия ОПК. Для подобных организаций вопрос внедрения ИИ является особенно проблемным в области, касающейся защиты данных. Тяжело представить, чтобы оборонное предприятие обучало нейросеть на сведениях, составляющих государственную тайну, что практически полностью исключает возможность применения глобальных наработок в этой области, позволяя работать только с локальными нейросетями, заметно проигрывающими на фоне сетей на открытых базах данных.

Предприятия, не имеющие доступа к государственным контрактам, имеют меньше возможностей для интеграции сложных технологий в свою работу, поскольку неизвестны сроки окупаемости подобной инновации. Представители этой части сектора внедряют ИИ только в качестве небольших пилотных проектов, что не позволяет в полной мере начать развитие технологии в этом направлении.

Выводы

Нейросети стали неотъемлемой частью российской экономии. Они проникают во все сферы, предоставляя уникальные возможности для развития и трансформации организаций. Преимущества использования искусственного интеллекта привлекают всех участников экономики страны к его интеграции в каком-либо виде.

Однако данная технология имеет ряд проблем по своему внедрению, которые были изложены выше на примере некоторых сфер экономики. Большинство этих барьеров связано с инновационностью технологии и отсутствия единой экосистемы для развития искусственного интеллекта в нашей стране. Дальнейшая интеграция нейросетей в экономику России должна проходить при совместных усилиях как со стороны организаций, так и со стороны государства в вопросах нормативного характера.

В. В. Путин в ноябре 2025 года на конференции «Путешествие в мир искусственного интеллекта» назвал технологии искусственного интеллекта «по-настоящему долгосрочным вложением в будущее» [7].

Список литературы:

1. Абашкин. В. Л., Ковалёва Г. Г. Применение искусственного интеллекта в российских компаниях // Искусственный интеллект. Серия информационно-аналитических материалов

ИСИЭЗ НИУ ВШЭ. 2025. №18. Электронная копия доступна на сайте https://issek.hse.ru URL: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1083540434.pdf (дата обращения: 20.02.2026).
2. Ласкина Л. Ю., Силакова Л. В., Варакса А. М. Внедрение инноваций в ритейле и их влияние на стоимость компании // Экономика. Информатика. 2020. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-innovatsiy-v-riteyle-i-ih-vliyanie-na-stoimost-kompanii (дата обращения: 20.02.2026).
3. Использование цифровых технологий организациями по Российской Федерации, субъектам Российской Федерации и видам экономической деятельности (с 2003 г.). Федеральная служба государственной статистики. 2025. Электронная копия доступна на сайте https://rosstat.gov.ru URL: https://rosstat.gov.ru/statistics/science (дата обращения 20.02.2026).
4. Синявская Е. Е. Искусственный интеллект в финансовой сфере // Вестник Академии знаний. 2025. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-finansovoy-sfere (дата обращения: 20.02.2026).
5. Стадник В. В., Ильина Т. С., Пивоварова Е. А. Возможность использования искусственного интеллекта для анализа фондового рынка // Сборник материалов математика и математическое моделирование. 2025. 1–19. С.208-209
6. Авилова В. В., Владыка М. В. Перспективы и проблемы применения искусственного интеллекта в промышленности // РППЭ. 2024. №10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-i-problemy-primeneniya-iskusstvennogo-intellekta-v-promyshlennosti (дата обращения: 20.02.2026).
7. Путин В. В. Выступление на пленарном заседании конференции «Путешествие в мир искусственного интеллекта» [Электронный ресурс] // Официальный сайт Президента России. 19 ноября 2025. URL: http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/78498 (дата обращения: 20.02.2026).

КАДРОВЫЙ ГОЛОД

Сергеева А.С., Паюрова Е.А.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

На начало 2026 г. российский рынок труда демонстрирует устойчивое состояние, которое в экономической литературе последних лет получило образное наименование «кадровый голод». Кадровый голод — термин, который означает дефицит квалифицированных специалистов на рынке труда. Это ситуация, когда количество открытых вакансий превышает число соискателей, и компании не успевают нанимать людей в разумные сроки и бюджет. Согласно данным Федеральной службы государственной статистики, совокупный заявленный спрос на рабочую силу достиг 4,2 млн вакансий, что является максимальным значением с 2006 г. При этом уровень безработицы опустился до исторического минимума в 2,2–2,3% . Мы живем в ситуации, где количество вакансий в 5 раз превышает число официально зарегистрированных безработных. Если посмотреть на платформы вроде hh.ru, мы увидим резкий рост конкуренции: в январе 2026 года количество вакансий сократилось на 30% по сравнению с прошлым годом, а число резюме выросло на 39% . Индекс конкуренции достиг 9,6 (против 3,5 в 2023 году) — это значит, что на одну вакансию претендуют почти 10 человек . Как это сочетается с кадровым голодом? Это и есть структурный дисбаланс: есть люди, но нет нужных специалистов.

Цель доклада — разобраться в глубинных причинах этого явления, оценить масштабы бедствия и, самое главное, понять, что делать бизнесу и государству в сложившихся условиях.

Причины нынешнего кадрового коллапса нельзя сводить к чему-то одному. Это эффект наложившихся друг на друга тектонических сдвигов в демографии, экономике и психологии.

Первое и, пожалуй, основное — это демографическая яма. Фундаментальной причиной кадрового дефицита выступает демографический переход: если в 1986–1987 годах в РСФСР рождалось порядка 2,5 млн детей в год, то к 1999 году этот показатель рухнул до 1,2 млн. В результате в 2023–2026 годах в активный трудоспособный возраст вступает малочисленная когорта рубежа веков, а на пенсию одновременно выходит многочисленное поколение послевоенного бэби-бума. Возникает эффект «демографического ножа», когда численность входящих в трудовой ресурс оказывается существенно ниже численности

выходящих, что делает этот инерционный фактор «базовым вызовом» для рынка труда на ближайшие 15–20 лет.

Второй фактор — миграционные процессы. Наложение долгосрочных структурных тенденций на геополитические события 2022–2024 годов многократно усилило кадровый голод. После февраля 2022 года Россию покинуло от 100 до 200 тысяч специалистов (IT, маркетинг, консалтинг, наука), что привело к критическому дефициту в IT‑секторе и многократному росту зарплат. В сравнении с 2021 годом, где средняя заработная плата составляла от 120 000 до 140 000 рублей, в 2025 году она выросла до 180 000-250 000 рублей в месяц. Осенью 2022 года частичная мобилизация изъяла из экономики сотни тысяч мужчин наиболее активного трудоспособного возраста (25–50 лет) из промышленности, строительства, логистики и управления, замещение которых оказалось крайне затруднено. Помимо этого, сократился приток трудовых мигрантов из-за изменения курса валют и ужесточения законодательства. Приток рабочей силы снизился, а отток — вырос.

Третий фактор — структурные изменения в экономике. Наша экономика переживает период серьезной трансформации. Бурный рост импортозамещения, в том числе и в военно-промышленном комплексе создал огромное количество новых высокооплачиваемых рабочих мест. Параллельно мы видим «перегрев» отдельных отраслей, таких как IT, строительство, логистика, где зарплаты растут быстрее, чем успевают появляться новые специалисты. Произошло перераспределение рабочей силы, и многие отрасли, например, традиционная промышленность или бюджетная сфера, оказались в проигрыше.

И четвертая причина — это разрыв между образованием и реальными потребностями рынка. Структурный дисбаланс на рынке труда обусловлен двумя факторами. В 1990–2000-е годы под влиянием рыночных реформ сформировался стереотип о приоритетности «офисных» профессий, что привело к переизбытку юристов и менеджеров (в 2–3 раза выше потребности) при остром дефиците инженерно-технических и рабочих кадров — зарплата токаря сегодня сопоставима с доходом начинающего IT-специалиста. Одновременно образовательная система инертна: технологический цикл сократился до 3–5 лет, но вузы и колледжи медленно обновляют программы, выпускники приходят с устаревшими знаниями, а предприятия вынуждены доучивать их за свой счет.

Острее всего кадровый голод ощущается в следующих отраслях:

1. Рабочие специальности. Это абсолютный рекордсмен дефицита. Слесари, электрики, водители, строители нужны везде. Квалифицированный рабочий сегодня — «штучный товар».
2. Массовый линейный персонал. Продавцы, кассиры, курьеры, операторы колл-центров. Здесь высочайшая текучка, связанная с физической и эмоциональной нагрузкой, что создает постоянный «вакуум» рабочих мест.
3. Инженерно-технические работники (ИТР). Технологи, конструкторы, главные инженеры. Здесь проблема в другом — старение кадров. Опытные специалисты уходят, а молодежь не спешит им на смену из-за сложности профессии и не всегда высокой на старте зарплаты.
4. IT-специалисты. Цифровизация проникла во все сферы, и спрос на программистов и разработчиков только растет. Дефицит здесь сохраняется, в том числе из-за оттока айтишников за границу.

У этого кризиса есть последствия как для бизнеса, так и для самих сотрудников.

Для организаций все печально. Во-первых, это зарплатная гонка. Чтобы переманить сотрудника, компании вынуждены постоянно повышать зарплаты, что ведет к неконтролируемому росту фонда оплаты труда. Во-вторых, происходит снижение стандартов найма. Компании уже не могут выбирать лучших; они вынуждены брать тех, кто есть, часто с недостаточной квалификацией. И в-третьих, как следствие, можно заметить срыв сроков проектов, а иногда и вынужденный отказ от выгодных заказов просто потому, что их некому выполнять.

Для сотрудников, которые остались на рынке, последствия тоже неоднозначные. Да, в дефицитных сферах зарплаты растут. Но оборотной стороной медали является кратное повышение нагрузки. Люди работают «за себя и за того парня». А это прямой путь к профессиональному выгоранию. В этом и заключается парадокс: высокая зарплата и полное отсутствие желания работать из-за усталости.

Очевидно, что простого решения, которое можно было бы принять сегодня и получить результат завтра, не существует. Нужна системная работа на двух уровнях: на уровне компании и на уровне государства.

На уровне организаций (HR-стратегии) есть четыре ключевых направления:

1. Автоматизация и роботизация. Это уже не тренд, а необходимость. Там, где человека можно заменить машиной, это нужно делать. Кассы самообслуживания в ритейле, складские роботы в логистике, внедрение софта для рутинных операций в офисе — все это высвобождает людей для решения более сложных задач.
2. Внутреннее обучение и «фабрики кадров». Эпоха, когда работодатели ждали готового специалиста уходит. Компании вынуждены сами «выращивать» кадры. Они берут стажера без опыта, обучают его под свои стандарты и получают лояльного сотрудника.
3. Пересмотр требований. Нужно активнее искать кандидатов со смежным опытом, рассматривать людей старшего возраста 50+, сотрудничать с людьми с инвалидностью. Компаниям нужен просто хороший работник, а не идеальный кандидат из учебника.
4. Удержание персонала. Удержать сотрудника дешевле, чем найти нового. Улучшение условий труда, гибкие графики, возможность удаленной работы, забота о ментальном здоровье — все это становится важнее, чем просто высокая зарплата.

На уровне государства уже много сделано, в том числе:

1. Национальный проект «Кадры» — это государственная программа РФ, действующая с 1 января 2025 по 2030 год, направленная на устранение дефицита специалистов, обеспечение экономики профессионалами и развитие системы образования. Проект предусматривает бесплатное переобучение, повышение квалификации и модернизацию служб занятости.
2. Поддержка сельских территорий и аграрно-промышленного комплекса (далее АПК) — цель достичь 95 % обеспеченности кадрами АПК к 2030 г. через развитие профильного образования, сельскую ипотеку и дополнительные субсидии.
3. Профессиональное обучение и переобучение — в 2025 г. обучено 119,4 тыс. человек, из них трудоустроено 97 тыс. (81,2 %); особое внимание уделяется работникам оборонно-промышленного комплекса.
4. Профориентация и ярмарки вакансий — всероссийская ярмарка «Работа России. Время возможностей» охватила 450 тыс. участников, представлено более 500 тыс. вакансий; проведен фестиваль профессий с практическими пробами.
5. Целевая поддержка ветеранов СВО — открыто более 1,6 тыс. вакансий, работодателям компенсируют до 200 тыс. руб. за оборудование рабочего места для бойцов с инвалидностью; доступно более 200 программ переобучения (включая IT-направления).
6. Законодательные изменения — в ноябре 2025 г. приняты поправки в закон «О занятости населения», усиливающие меры содействия занятости и развивающие инфраструктуру рынка труда.

Таким образом, Российский рынок труда вступил в эпоху структурной перестройки, где традиционные механизмы регулирования занятости перестают работать. Кадровый голод — не следствие временных экономических трудностей, а проявление глубинных демографических сдвигов, институциональных разрывов и ценностных трансформаций, которые будут определять контуры занятости на десятилетие вперед. Экономика столкнулась с объективным ограничением: экстенсивный путь развития, основанный на наращивании численности занятых, исчерпан.

В этих условиях ключевым ресурсом становится не количество работников, а качество их использования. Для бизнеса это означает переход от конкуренции за «готового специалиста» к инвестициям в человеческий капитал внутри компании — через автоматизацию, переобучение, гибкие форматы и культуру удержания. Для государства — смену роли с пассивного наблюдателя на активного координатора, формирующего долгосрочные прогнозы, синхронизирующего образовательную систему с реальным сектором и создающего инфраструктуру для непрерывного профессионального развития.

Кадровый дефицит не будет преодолен разовыми мерами, но он может стать катализатором для модернизации подходов к управлению трудом — как на уровне отдельных предприятий, так и на уровне национальной политики. Успех будет зависеть от того, насколько быстро все участники процесса осознают: в экономике, где людей становится меньше, каждый работник требует большего внимания, инвестиций и уважения.

***Список литературы*:**
1. Федеральный закон от 12.12.2023 № 565-ФЗ «О занятости населения в Российской Федерации» // КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_464093
2. Дефицит рабочей силы на региональном рынке труда: причины и пути решения проблемы // КиберЛенинка : [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/defitsit-rabochey-sily-na-regionalnom-rynke-truda-prichiny-i-puti-resheniya-problemy/viewer
3. «Кадровый голод» в России // КиберЛенинка : [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kadrovyy-golod-v-rossii/viewer
4. В чем причина кадрового дефицита в России? // Клерк : [сайт]. – URL: https://www.klerk.ru/buh/articles/663218/#chapter-v-chem-prichina-kadrovogo-deficita-v-rossii
5. Росстат назвал профессии с самой большой нехваткой кадров в 2025 году // РИА Новости : [сайт]. – 26.04.2025. – URL: https://ria.ru/20250426/rosstat-2013531654.html

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФИНАНСОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ

Мотина А.С.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В современной системе высшего образования развитие студенческого самоуправления и поддержка молодежных инициатив рассматриваются в качестве приоритетных направлений государственной молодежной политики. Студенческие объединения — от профсоюзных организаций до творческих студий и волонтерских центров — выполняют важную функцию социализации, профессионального становления и организации внеучебной деятельности. Однако эффективность их работы напрямую зависит от наличия понятных, доступных и гибких механизмов финансирования.

Правовое регулирование финансирования студенческих объединений представляет собой многоуровневую систему, включающую федеральные, региональные и локальные нормативные акты.

1. Федеральный уровень

Основу федерального регулирования составляют:

- Федеральный закон от 12.01.1996 № 7-ФЗ «О некоммерческих организациях» (ст. 31.1), который устанавливает формы поддержки социально ориентированных некоммерческих организаций (СО НКО). К таковым относятся профсоюзные организации обучающихся, студенческие общественные объединения и иные некоммерческие структуры, созданные при вузах.
- Указы Президента РФ и постановления Правительства РФ, определяющие приоритеты молодежной политики и механизмы грантовой поддержки. Ключевыми документами выступают: Постановление Правительства РФ от 02.03.2021 № 295 «О предоставлении и распределении грантов в форме субсидий из федерального бюджета…», а также нормативные акты, регламентирующие деятельность Федерального агентства по делам молодежи (Росмолодежь) и Фонда президентских грантов.

2. Региональный уровень

На региональном уровне действуют:

-Законы субъектов РФ о молодежной политике, которые часто предусматривают дополнительные меры поддержки (губернаторские стипендии, региональные грантовые конкурсы).

-Постановления правительств регионов о порядке предоставления субсидий социально ориентированным НКО, в том числе студенческим объединениям.

3. Локальный уровень (вузовский)

Внутривузовские нормативные акты играют определяющую роль, поскольку именно они устанавливают конкретные процедуры доступа к средствам. Главным локальным документом, регулирующим финансовую поддержку обучающихся, является Положение о стипендиальном обеспечении и других формах материальной поддержки обучающихся.

На примере НИЯУ МИФИ данный документ утвержден приказом ректора от 18.04.2017 № 108/2 (с изменениями, внесенными приказами от 19.12.2022 № 353/3 и от 10.06.2023 № 191/4). Он включает в себя:

- Положение о государственных академических стипендиях, повышенных государственных академических стипендиях, государственных стипендиях аспирантам, дополнительных и именных стипендиях;
- Положение о государственной социальной стипендии, повышенной государственной социальной стипендии и социальной поддержке обучающихся:
- Помимо стипендиальных положений, в вузах действуют документы, регламентирующие порядок выделения средств на реализацию студенческих проектов (положения о конкурсах студенческих инициатив, о грантовой поддержке и др.).

В практике финансирования студенческих объединений выделяются три основных источника: бюджетные средства, внебюджетные средства и специальные фонды — эндаументы (целевые капиталы).

Бюджетное финансирование остается базовым источником. К нему относятся:

а) Целевые субсидии — средства, выделяемые вузу из федерального или регионального бюджета на реализацию программ развития студенческих объединений. Они направляются на материально-техническое обеспечение кружков, творческих студий, спортивных секций.

б) Средства государственного задания — часть средств, заложенных в смету вуза на воспитательную работу и внеучебную деятельность.

Механизм доведения бюджетных средств до студенческих объединений выглядит следующим образом: распорядитель средств (ректорат, управление по воспитательной работе, профсоюзная организация) распределяет их на основании заявок, смет или конкурсных процедур. Основные проблемы этого механизма — позднее доведение лимитов бюджетных обязательств (часто во втором полугодии) и жесткая привязка к статьям расходов, что ограничивает оперативность использования средств.

Внебюджетные источники включают:

а) Доходы от коммерческой деятельности университета. Многие вузы направляют часть средств, полученных от дополнительного профессионального образования, научных разработок, аренды помещений, на поддержку студенческих объединений. В частности, именно из этих средств оплачивается труд руководителей секций и кружков.

б) Гранты. Крупнейшими операторами грантовой поддержки выступают:

- Росмолодежь (ФГАИС «Молодежь России»): в 2025 году поддержано более 1 500 студенческих проектов, общая сумма финансирования превысила 3,5 млрд рублей.
- Фонд президентских грантов: в 2025 году на поддержку молодежных инициатив направлено более 4 млрд рублей.
- Вузовские грантовые конкурсы, проводимые за счет внебюджетных средств.

в) Спонсорские средства и пожертвования от индустриальных партнеров, выпускников и иных организаций, предоставляемые на конкретные мероприятия.

Эндаументы представляют собой наиболее устойчивый источник долгосрочного финансирования. Их суть заключается в том, что на финансирование студенческих инициатив направляется не сам капитал, а доход от его доверительного управления, формируемый за счет пожертвований выпускников, партнеров и иных благотворителей.

Сравнительная таблица фондов поддержки студенческих инициатив

Критерий	НИЯУ МИФИ: Фонд «Раскрывая таланты»	СПбПУ: Целевой капитал № 2 «Развитие молодежных проектов и студенческого профсоюзного движения»
Объем капитала	Данные не публикуются; ежегодное направление на поддержку — до 5 млн руб.	4 950 676 руб. (на 31.12.2024)
Инициатор создания	Администрация университета при участии Попечительского совета	Профсоюзная организация студентов и аспирантов СПбПУ
Направления поддержки	Создание арт-объектов, поездки творческих коллективов, мероприятия студенческих объединений,	Грантовая поддержка молодежных проектов, выявление молодежных активистов, содействие в

	развитие сообщества выпускников, творческие конкурсы	оформлении инициатив, развитие социальных и проектных навыков
Механизм распределения	Решения принимает Попечительский совет Фонда	Грантовые конкурсы, проектные сессии с участием студентов; в декабре 2020 года проведен конкурс с призовым фондом 400 тыс. руб.
Особенности модели	Централизованное управление, фокус на творческих инициативах	Инициатива снизу, высокая вовлеченность студентов в распределение средств; в октябре 2025 года проведена проектная сессия с участием 15 студенческих команд, три из которых получили сертификаты на реализацию проектов

Модель СПбПУ является более демократичной и ориентированной на прямое участие студентов в распределении средств, тогда как модель МИФИ предполагает централизованное управление через Попечительский совет. Оба подхода имеют право на существование, однако в контексте развития студенческого самоуправления модель с инициативой «снизу» представляется более перспективной.

Процедуры финансирования и распределения средств.

1. Грантовая поддержка (конкурсный механизм)

Грантовый механизм является наиболее распространенным способом распределения средств как бюджетных, так и внебюджетных фондов. Процедура включает следующие этапы:

1. Подача заявки студенческим объединением с описанием идеи, состава команды, сметы расходов, плана софинансирования и ожидаемых результатов.

2.Экспертиза и оценка заявок комиссией. Типичные критерии оценки: актуальность и социальная значимость, реализуемость, наличие софинансирования, компетенции команды, масштабируемость.

3.Конкурсное распределение средств и заключение соглашения (договора) с победителями.

4.Отчетность о целевом использовании средств и достигнутых результатах.

2. Студенческое инициативное бюджетирование (СИБ)

СИБ представляет собой механизм, при котором студенты самостоятельно определяют направления расходования части внебюджетных средств вуза. Пилотным проектом в этой сфере является опыт Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ), реализованный при поддержке Минобрнауки и Минфина России.

Процедура СИБ в ИРНИТУ включает следующие этапы:

1. Информационная кампания — оповещение студентов о старте конкурса и правилах участия.
2. Выдвижение идей — студенты предлагают проектные инициативы (благоустройство, мероприятия, оборудование и пр.).
3. Экспертиза — техническая и экономическая оценка предложений.
4. Публичная защита — авторы проектов презентуют свои инициативы студенческому сообществу.
5. Открытое голосование в электронной системе — студенты выбирают проекты-победители.
6. Финансирование на основании приказа ректора.

Аналогичные практики внедрены в Томском политехническом университете и НИУ ВШЭ. Основные сложности при реализации СИБ: сопротивление администрации, низкая явка на голосование, сложность проведения экспертизы силами студентов.

3. Субсидирование крупных объединений

Для крупных студенческих объединений (например, студенческих отрядов, зарегистрированных НКО) применяется механизм субсидий. Его ключевая особенность — обязательное заключение договора (соглашения), утверждение плана и сметы.

Важное нововведение 2026 года — казначейское сопровождение субсидий. Основные изменения введены следующими документами:

- Федеральный закон от 28.11.2025 № 432-ФЗ — внес поправки в Бюджетный кодекс РФ (статьи 242.23–242.25), расширив сферу казначейского сопровождения.
- Федеральный закон от 28.11.2025 № 426-ФЗ — закон о федеральном бюджете на 2026 год, установивший конкретные критерии применения казначейского сопровождения.

Ключевые параметры нововведений:

- Казначейскому сопровождению подлежат субсидии, предоставляемые не только на федеральном, но и на региональном и муниципальном уровнях.
- Снижен порог обязательного сопровождения: в 2026 году — от 10 млн рублей (в 2025 году порог составлял 50 млн рублей).
- Требования распространены на всех участников кооперации (субподрядчиков и соисполнителей).
- Получатель субсидии обязан открыть лицевой счет в территориальном органе Федерального казначейства. Каждый платеж проходит проверку на соответствие утвержденной смете; при выявлении нарушений операции блокируются.
- Условия о казначейском сопровождении в обязательном порядке включаются в договор. Нарушение этих условий является основанием для расторжения договора и возврата средств.

Системные проблемы финансирования студенческих объединений

Анализ существующей практики позволяет выделить следующие системные проблемы:

1.Разрозненность процедур доступа к целевым фондам. В каждом вузе действуют собственные правила выделения средств, что затрудняет масштабирование успешных практик и создает избыточную административную нагрузку.

2.Низкая вовлеченность студентов в распределение бюджетных средств. Решения о финансировании чаще всего принимаются административно, без широкого участия студенческого сообщества.

3.Избыточные налоговые и бухгалтерские барьеры. Сложности возникают при проведении безналичных расчетов на небольшие суммы (до 100 тыс. рублей) и при выплате вознаграждений студентам-волонтерам.

4.Отсутствие легальных механизмов оплаты труда руководителей студенческих объединений. Лидеры студенческих проектов, затрачивающие значительное время на организационную работу, часто не имеют возможности получать оплату своего труда в рамках правового поля.

5.Недостаточная информированность студентов о существующих источниках финансирования. Многие потенциальные проектные команды не знают о доступных грантах, субсидиях и внутривузовых конкурсах.

Предложения по оптимизации механизмов финансирования

1. Унификация процедур доступа к целевым фондам

Предлагается распространить опыт таких вузов, как НИЯУ МИФИ и СПбПУ, по созданию специализированных фондов поддержки студенческих инициатив. Для этого целесообразно разработать типовое положение о фонде поддержки студенческих инициатив, которое вузы могли бы адаптировать под свои условия. Это позволит обеспечить стабильное финансирование, не зависящее от годового бюджета, и создать единые прозрачные правила доступа к средствам.

2. Расширение практики студенческого инициативного бюджетирования

Рекомендуется закрепить в локальных нормативных актах вузов выделение 5–10 % внебюджетных средств на проекты, определяемые студенческим голосованием. При этом необходимо четко прописать:

- источник формирования средств (например, часть доходов от ДПО или иной приносящей доход деятельности);
- механизм аккумуляции средств;
- порядок выдвижения, экспертизы и отбора проектов;
- процедуру отчетности победителей.

Такой подход повысит вовлеченность студентов в управление вузом и снизит коррупционные риски при распределении средств.

3. Упрощение налогового и бухгалтерского учета

Текущие сложности при безналичных расчетах на сумму до 100 тыс. рублей и выплате вознаграждений студентам-волонтерам требуют законодательного упрощения. Предлагается:
- Ввести упрощенную отчетность для студенческих проектов, аналогичную отчетности по грантам (единая форма, освобождение от избыточных требований к обоснованию каждой позиции сметы).
- Для студенческих объединений, зарегистрированных как НКО, предусмотреть возможность применения упрощенной системы налогообложения (УСН) с особыми условиями.
- Разработать льготный порядок налогообложения грантов, получаемых студенческими объединениями.
4. Легализация труда руководителей объединений

В настоящее время отсутствует системная практика оплаты труда руководителей студенческих объединений. В качестве авторского предложения рекомендуется внедрить один из следующих механизмов:
Модель 1. Договоры гражданско-правового характера (ГПХ). Заключение с лидерами объединений договоров на выполнение конкретных работ (организация мероприятий, ведение проектов, координация деятельности) за счет внебюджетных средств университета. Это позволяет формализовать отношения и обеспечить оплату труда в рамках правового поля.
Модель 2. Персональные надбавки из внебюджетных доходов. Введение приказом ректора системы персональных стимулирующих выплат для руководителей студенческих объединений, добившихся значимых результатов. Источником выступают доходы от коммерческой деятельности университета.

Обе модели требуют закрепления в локальных нормативных актах и разработки прозрачных критериев назначения.

Переход от административного сметного финансирования к модели с диверсифицированными источниками (бюджетные субсидии, доходы от эндаументов, инициативное бюджетирование) позволяет не только повысить устойчивость студенческих объединений, но и сформировать у студентов навыки проектного управления, финансового планирования и социального проектирования.

Перспективы дальнейшего исследования связаны с разработкой конкретных моделей внедрения СИБ в вузах, анализом эффективности различных форм легализации труда руководителей объединений, а также с оценкой влияния новых правил казначейского сопровождения на доступность субсидий для студенческих НКО.

Список литературы:

1. Федеральный закон от 12.01.1996 № 7-ФЗ «О некоммерческих организациях» (с изменениями и дополнениями) // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_14424/
2. Постановление Правительства РФ от 02.03.2021 № 295 «О предоставлении и распределении грантов в форме субсидий из федерального бюджета…» // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: http://pravo.gov.ru
3. Приказ ректора НИЯУ МИФИ от 18.04.2017 № 108/2 «Об утверждении Положения о стипендиальном обеспечении и других формах материальной поддержки обучающихся» (в редакции приказов от 19.12.2022 № 353/3 и от 10.06.2023 № 191/4) // Официальный сайт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“». URL: https://www.mephi.ru/
4. Федеральный закон от 28.11.2025 № 432-ФЗ «О внесении изменений в Бюджетный кодекс РФ» // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: http://pravo.gov.ru
5. Федеральный закон от 28.11.2025 № 426-ФЗ «О федеральном бюджете на 2026 год» // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: http://pravo.gov.ru
6. Положение о государственных академических стипендиях, повышенных государственных академических стипендиях, государственных стипендиях аспирантам, дополнительных и именных стипендиях // Официальный сайт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“». URL: https://www.mephi.ru/
7. Положение о государственной социальной стипендии, повышенной государственной социальной стипендии и социальной поддержке обучающихся // Официальный сайт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования «Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“». URL: https://www.mephi.ru/
8. Нормативные документы Федерального агентства по делам молодежи (Росмолодежь) // Официальный сайт федерального агентства по делам молодежи. URL: https://fadm.gov.ru/
9. Документы Фонда президентских грантов // Официальный сайт Фонда президентских грантов. URL: https://президентскиегранты.рф/
10. Материалы по студенческому инициативному бюджетированию ИРНИТУ // Официальный сайт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». URL: https://www.istu.edu/
11. Положение о Фонде «Раскрывая таланты» НИЯУ МИФИ // Официальный сайт Фонда целевого капитала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“». URL: https://endowment.mephi.ru/raskryvaya_talanty

ЧИСЛЕННЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ТРУДОВОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ «РАБОТНИК-РАБОТОДАТЕЛЬ»

Грахольская Л.В., Мантуров А.О.
Поволжский институт управления им. П.А.Столыпина – филиал РАНХиГС, г. Саратов

Введение

Функционирование любой экономики во многом (если не во всём) определяется устойчивостью реализуемой модели рынка труда [1,2]. Наряду с медленными системными изменениями, связанными со сменой социально-политических и общих экономических условий, наблюдается локальная во времени и пространстве (в рамках, например, одного экономического субъекта - предприятия, населённого пункта или иной административной единицы) вариабельность, связанная с различными динамическими изменениями. Такая локальная вариабельность, как видится, может быть разделена на «детерминированную» и «случайную» составляющие, к первой из которых могут быть отнесены спонтанные (по собственному желанию) увольнения работников по причинам неудовлетворённости условиями труда, принудительные увольнения по инициативе работодателя, а ко второй - обратимые изменения численности из-за временной нетрудоспособности, плановых или внеплановых отпусков, сезонных колебаний загрузки предприятия заказами и т.п.

На уровне отдельно взятого субъекта трудовых отношений, как отмечалось в [3], колебания численности работников приводят к перераспределению удельной нагрузки и изменению их трудовых ролей, что может оказать влияние на деятельность такого субъекта в долговременной перспективе. В целом же, динамические колебания численности безусловно оказывают опосредованное влияние на вероятность спонтанного увольнения работников. Одним из возможных предельных результатов развития таких процессов является, например, коллапс предприятий [3], что критично для общей экономической ситуации. Безусловно, такие ситуации необходимо предсказывать, в том числе, путём моделирования. В связи с этим, целью настоящей работы является построение и предварительный анализ динамических моделей, позволяющих качественно предсказывать развитие кадровой ситуации на рынке труда с учётом влияния факторов, регулирующих трудовое поведение работников.

Основная часть

Ранее известные модели трудовых отношений, как правило, являются статическими и не учитывают развитие того или иного сценария трудового поведения работников во времени [1,2]. Кроме того, подавляющее большинство известных моделей, учитывающих время как независимую переменную, ориентировано на получение обобщённых оценок по всей экономике (и в лучшем случае - по её отраслям) [4,5]. Наконец, применение аппарата обыкновенных дифференциальных уравнений, имея давнюю предысторию в экономических задачах [6-8], тем не менее оставляет в целом нерешённой проблему корректности находимых решений с точки зрения устойчивости используемых для этого численных методов. С учётом изложенного выше, рассмотрим построение дискретных моделей для описания динамики трудового поведения системы «работник-работодатель».

Многочисленные исследования статистики текучести кадров свидетельствуют о том, что значительная доля добровольных увольнений вызвана недовольством размером заработной платы или (что, по сути, аналогично) расхождением между фактическим и желаемым уровнем

дохода [9]. Это даёт основания полагать, что денежное вознаграждение выступает ключевым фактором при определении работниками стратегии своего дальнейшего поведения на рынке [10]. В этой связи далее в работе в качестве единственного параметра, воздействующего на трудовое поведение работника, будем рассматривать оплату труда, приведённую к конкретной величине заработной платы либо дохода от деятельности.

Сформулируем модель, которая описывает детерминированное изменение численности занятых на рынке труда. Будем считать, что данный показатель меняется дискретно во времени, причём его значение в момент (*i+1*) определяется значением в предыдущий момент *i*, величиной удельной рабочей нагрузки на одного занятого и параметром, интерпретируемым как «степень удовлетворённости оплатой труда»:

$$m_{i+1} = f(m_i, g_i, S_i) \quad (1)$$

Здесь m_i — численность занятых в *i*-й момент времени, g_i — удельная рабочая нагрузка (в расчёте на одного человека), S_i — заработная плата занятого, дискретный индекс *i* привязан к определённым календарным интервалам (месяц, квартал, год). Исходя из допущений (1), запишем:

$$m_{i+1} = m_i + \nu_i - \lambda g_i/S_i,\ S_i = S/m_i,\ g_i = Q_0/m_i \quad (2)$$

Здесь λ — коэффициент, обеспечивающий переход от размерности «количество человек» к размерности коэффициента «степень удовлетворённости оплатой труда», Q_0 — суммарная рабочая нагрузка на рынке, ν_i — фиксированное пополнение численности занятых в течение рассматриваемого дискретного интервала (предполагается, что найм идёт из неограниченного резервуара рабочей силы). Можно видеть, что построенная модель (2) представляет собой дискретное одномерное отображение [11], принципы построения модели проиллюстрированы на рис.1 и рис.2.

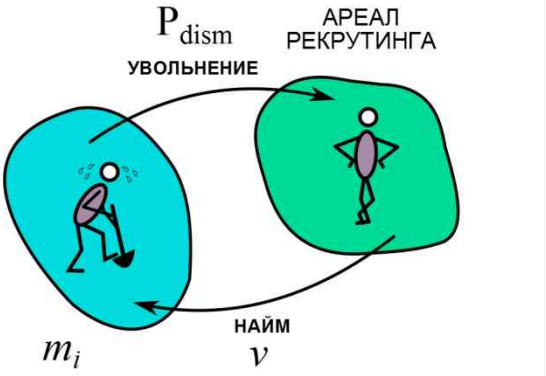


Рисунок 1 – Дискретная модель динамики найма-увольнения на рынке трудовых ресурсов. На рисунке слева - множество работающих, справа - неограниченный источник найма. Вероятность увольнения P_{dism} непосредственно определяется слагаемым $\lambda g_i/S_i$

После замены переменных и нормировки получаем модель в форме без размерности:

$$\mu_{i+1} = \mu_i + \nu_i - C_0/\mu_i \quad (3)$$

Исследуем поведение модели. Определим неподвижную точку — такой набор параметров, при котором численность занятых не меняется за один период наблюдения: $\mu_i = \mu_{i+1}$. Если $\nu_i = \nu =$ const, то система одномерная:

$$\mu_{i+1} = F(\mu_i) = \mu_i + \nu - C_0/\mu_i,$$

и если μ* - неподвижная точка, то

$$\mu^* = F(\mu^*),\ \text{и}\ \mu^* = \mu^* + \nu - C_0/\mu^*,\ \mu^* = C_0/\nu$$

Производная $F'(\mu) = 1 + C_0/\mu^2$.

В неподвижной точке $F'(\mu^*) = 1 + C_0/(C_0/\nu)^2 = 1 + \nu_2/C_0$, следовательно,

$$F'(\mu^*) = 1 + \nu^2/C_0 > 1\ (\forall\ \nu>0,\ C_0>0)$$

Поскольку $F'(\mu^*) > 1$, неподвижная точка всегда неустойчива (отталкивающий узел). Это подтверждает наличие отмеченной в [3] «вековой неустойчивости». Бифуркаций через $|F'(\mu^*)| = 1$ нет, так как $F' > 1$ при любых ν, $C_0 > 0$.

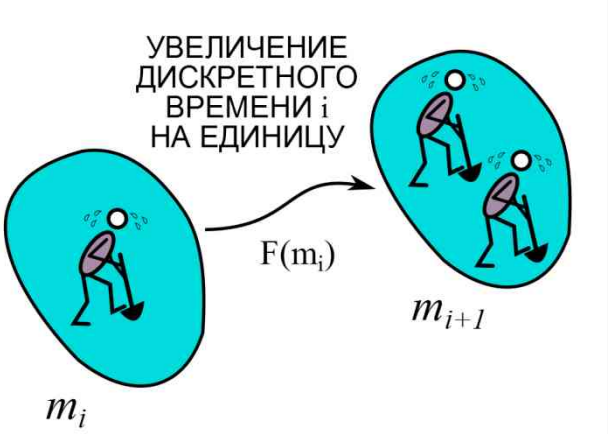


Рисунок 2 – Вычисление последовательных состояний (итераций) дискретной модели динамики найма-увольнения на рынке трудовых ресурсов. Слева и справа - состояния множества нанятых в *i*-й и (*i+1*)-й моменты дискретного времени соответственно

Таким образом, равновесному состоянию модели соответствует постоянный найм с интенсивностью $\nu_i = C_0/\mu_i$, при котором и реализуется неподвижная точка $\mu^* = C_0/\nu$. Иллюстрация этого состояния приведена на рис.3.

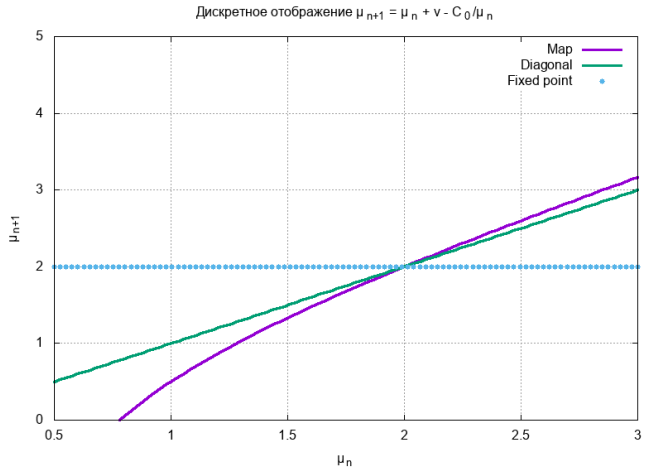


Рисунок 3 – Неподвижная точка отображения (3), соответствующая стационарному решению

Видно, что интенсивность найма зависит:

1. от начальной («оптимальной») численности занятых;
2. от отношения «оптимальная оплата труда — реальная оплата труда»; найм тем активнее, чем ниже фактическая заработная плата;
3. от числа занятых, остающихся на рынке труда в текущий момент. Имеет место компенсирующий найм.

В целом поведение данной модели отражает типичную картину постоянного оттока кадров, недовольных своим материальным положением. При отсутствии найма новых работников построенная модель, аналогично [3], демонстрирует неустойчивую динамику («вековая неустойчивость», [12]), когда сокращение численности занятых ведёт к росту удельной нагрузки, что, в свою очередь, провоцирует дальнейшее усиление оттока. Можно предположить, что именно это явление и порождает «проблему поколения NEET», провоцируя непрерывный отток молодых поколений (90-х и 2000-х годов рождения) с рынка трудовых ресурсов [13].

В современных условиях в качестве альтернативы системе фиксированной оплаты труда широко применяется так называемая «стимулирующая надбавка» — регулируемая доплата к основной заработной плате. Согласно одному из подходов, размер этой надбавки может определяться объёмом выполненной работы сверх установленного норматива Q_0/m_0.

Исследуем, как подобная стимулирующая надбавка воздействует на динамику численности занятых на рынке труда. Для этого, следуя методике, аналогичной ранее применённой, построим математическую модель, где учтём зависимость стимулирующей надбавки от избыточной удельной нагрузки ΔQ. Пусть эта зависимость является линейной. Тогда величина заработной платы S_Σ равна сумме базовой части S и регулируемой надбавки αΔQ:

$$S_\Sigma = S + \alpha\Delta Q$$

Коэффициент α задаёт связь между величиной надбавки и значением избыточной удельной рабочей нагрузки (иначе говоря - стоимость часа сверхурочной работы).

В соответствии со сделанными предположениями и выполнив преобразования аналогично приведённым выше, зависимость численности занятых от дискретного времени запишем следующим образом:

$$\mu_{i+1} = \mu_i + \nu - C_1/(C_3 + C_2\,\mu_i) \qquad (4)$$

где $C_1 = \lambda Q_0$, $C_2 = m_0(S_0 - \alpha Q_0)$, $C_3 = \alpha m_0 Q_0$.

Отображение (4) является гладким (отсутствуют разрывы при μ>0). Неподвижная точка существует только при условии $\nu < C_1/C_3$ (рис.4). Она является неустойчивой, поскольку ν, C1, C2 > 0, и, соответственно, F'(μ*) всегда больше единицы. Это означает, что неподвижная точка является неустойчивой (отталкивающий узел). При выполнении условий существования неподвижной точки она может быть определена как $\mu^* = (C_1 - \nu\,C_3)\,/\nu\,C_2$. Поскольку при F'(μ*)=1 должно выполняться условие ν=0 (при этом отсутствует неподвижная точка), а ситуация F'(μ*) = –1 нереализуема, то бифуркационные сценарии смены типа поведения отображения (4) отсутствуют. Таким образом, в пространстве управляющих параметров (C_1,C_3,ν) возможно следующее поведение неподвижной точки: при $\nu \to 0^+$ $\mu^* \to +\infty$; при $\nu = C_1/C_3$ $\mu^* \to 0$; при $\nu > C_1/C_3$ $\mu^* < 0$. Это означает, что устойчивое

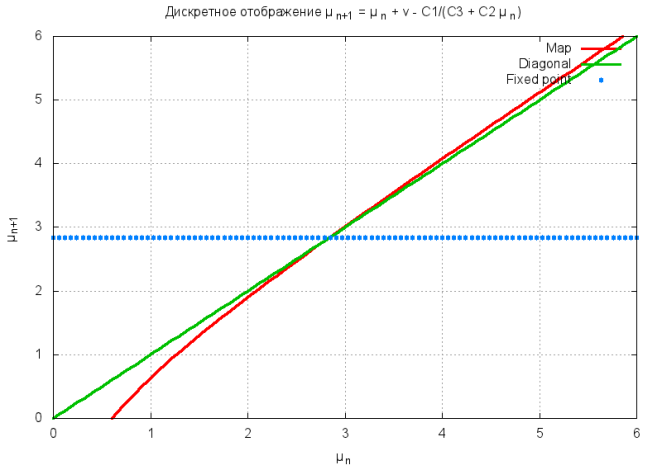


Рисунок 4 – Неподвижная точка отображения (4), соответствующая стационарному решению

и физически реализуемое равновесие в системе недостижимо даже при одновременном наличии постоянного рекрутинга новых работников и использовании «стимулирующей надбавки» для оплаты избыточной рабочей нагрузки

Заключение

В работе построены дискретные динамические модели, описывающие изменение численности занятых на рынке труда во времени в зависимости от величины рабочей нагрузки и заработной платы. Модели позволяют наблюдать процесс «утечки» кадров, а также изучать влияние на этот процесс удельной рабочей нагрузки и размера оплаты труда, и исследовать действие вводимой стимулирующей надбавки к заработной плате. Проведён анализ их устойчивости, показавший, что в рамках сделанных допущений стимулирующая надбавка, линейно зависящая от избыточной удельной рабочей нагрузки, не способна стабилизировать численность занятых на рынке труда.

Дальнейшее изучение рассматриваемой задачи, как видится, может быть направлено на поиск функции $\lambda g_i/S$, способной порождать устойчивые множества решений для (3) и (4). В связи с этим интересно отметить, что функция $\lambda g_i/S$, по сути, непосредственно описывает особенности трудового поведения работников и, конечно же, допускает возможность учёта не только материального стимулирования труда. Несомненный практический интерес будет

представлять также решение задачи оптимизации - минимизации расходов работодателя на оплату труда работников. Наконец, через вводимые ограничения на рекрутинг ν можно изучить явления конкуренции субъектов рынка труда, каждый из которых будет описываться своим дискретным отображением и своей уникальной функции $\lambda g_i/S$

Работа подготовлена в рамках реализации государственного задания 720000Ф.99.1. БН62АБ83000 (1.5-2026-1) «Трансформация модели трудового поведения в условиях становления традиционной ценностной парадигмы»

Список литературы:

1. Эренберг Р.Дж., Смит Р.С. Современная экономика труда. Теория и государственная политика. М.: Изд-во МГУ, 1996. 800 с.
2. Рощин С.Ю., Разумова Т.О. Теория рынка труда: Учеб.-метод. пособие. 2-е изд., испр. — М.: Экономический факультет МГУ, ТЕИС, 1999. 192 с.
3. Грахольская Л.В., Илларионов С.А., Якубович Е.В., Мантуров А.О. Тривиальная модель динамики численности сотрудников предприятия // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками. – 2025. – № 10. – С. 26-30. – EDN ZFFYPN.
4. Phillips A. W. H. The relation between unemployment and the rate of change of money wages rates in the UK (1861-1957) // Economica. 1958. №100 283-299
5. Белявский, М. О. Рынок труда в России и динамика изменения номинальной заработной платы / М. О. Белявский, А. Г. Коровкин, А. В. Полежаев // Проблемы прогнозирования. – 2000. – № 6. – С. 91-105. – EDN HRTTLV.
6. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. - 2-е изд., испр. — М.: Физматлит, 2001. 320 с
7. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия. — М.: Прогресс, 1971.
8. Махов С.А. Математическое моделирование мировой динамики и устойчивого развития на примере модели Форрестера. Препринт. ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. Москва, 2005. Режим доступа: https://www.keldysh.ru/papers/2005/prep06/prep2005_06.html дата обращения 20.08.2025
9. Деньги важнее всего. Как меняются трудовые ценности работающего человека. Режим доступа: https://www.superjob.ru/research/articles/115524/dengi-vazhnee-vsego/ дата обращения 23.03.2026 г.
10. Названы главные причины увольнения россиян. Режим доступа: https://www.rbc.ru/life/news/674da0639a794705f1603a02 дата обращения 01.08.2025
11. Кузнецов С. П. Динамический хаос. М. : ГИЗ ФИЗМАТЛИТ, 2006. 356 с.
12. Рабинович М. И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. – 3-е издание. — Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 560 с.
13. Власти решили установить, кто и почему в России не работает. Режим доступа: https://www.rbc.ru/economics/28/04/2025/680a3f799a79471b996a759a дата обращения 20.08.2025

МАРКЕТИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ В ВЫБОРЕ УСЛУГ ОПТИКИ Г. САРОВ

Петунина Е. О., Пасечникова Л.В., Ломтева Е.Е.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Маркетинговые исследования играют ключевую роль в понимании состояния рынка, предоставляя необходимую информацию для принятия стратегически важных решений. Без таких исследований невозможно эффективно собирать, анализировать и сравнивать данные, которые критически важны для оценки рыночной активности, выбора целевых сегментов, прогнозирования объемов продаж и планирования дальнейших действий.

Изучение потребительских предпочтений в сфере оптики позволяет выделить целевую аудиторию и адаптировать предложения под их нужды. Это знание помогает формировать успешные рекламные кампании, которые будут направлены на конкретные группы клиентов. Понимание своей целевой аудитории и умение привлекать ее внимание к продуктам являются основополагающими для достижения успеха в бизнесе.

Актуальность изучения конкурентной среды рынка оптики и особенностей покупательского поведения потребителей в современных условиях представляет собой важную задачу, от решения которой зависят результаты деятельности бизнеса и качество принимаемых управленческих решений.

Исследование основано на методах маркетингового анализа, в ходе которого определены задачи и разработаны рекомендации по совершенствованию и повышению эффективности маркетинговой деятельности на рынке оптики города Саров.

Результаты имеют практическую значимость для организаций, стремящихся улучшить обслуживание клиентов и повысить потребительскую ценность предоставляемых товаров и услуг.

В Сарове жители часто обращаются в салоны оптики для приобретения очков и контактных линз. Проведенные исследования показали, что при выборе оптики потребители в первую очередь акцентируют внимание на качестве продукции, репутации салона и ценовой политике. Эти факторы позволяют владельцам салонов более точно настраивать свои предложения и удовлетворять запросы клиентов. Результаты опроса, проведенного среди 68 человек, показали, что при выборе оптических товаров и услуг потребители в первую очередь обращают внимание на качество и цену.

По данным рисунка 1, для 48% респондентов наиболее важна цена, 40% больше всего ценят качество, 8% в первую очередь рассматривают дизайн и 4% важен бренд. Из полученных результатов следует, что для потребителей салонов услуг оптики в городе Саров в 2025 году наиболее важны такие характеристики приобретаемого товара, как цена и качество, а самую меньшую важность представляет бренд, набравший минимальное количество голосов в опросе.

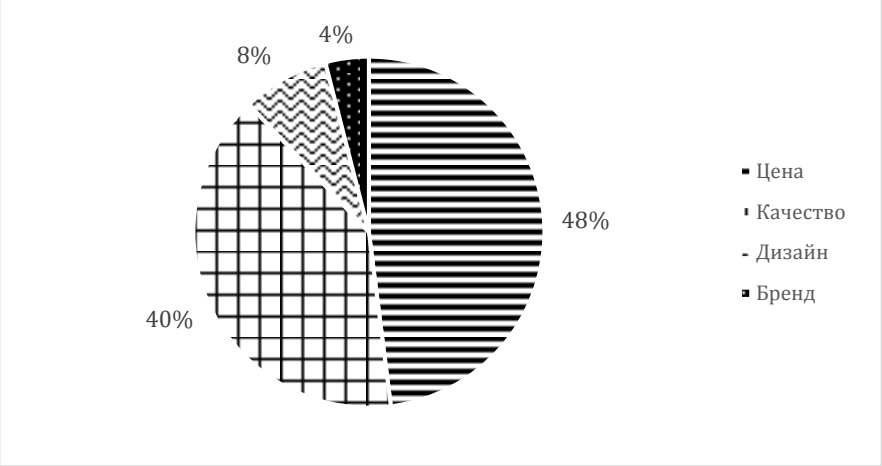


Рисунок 1 – Что для людей наиболее важно при выборе оптики в г. Саров в 2025 г., в %.

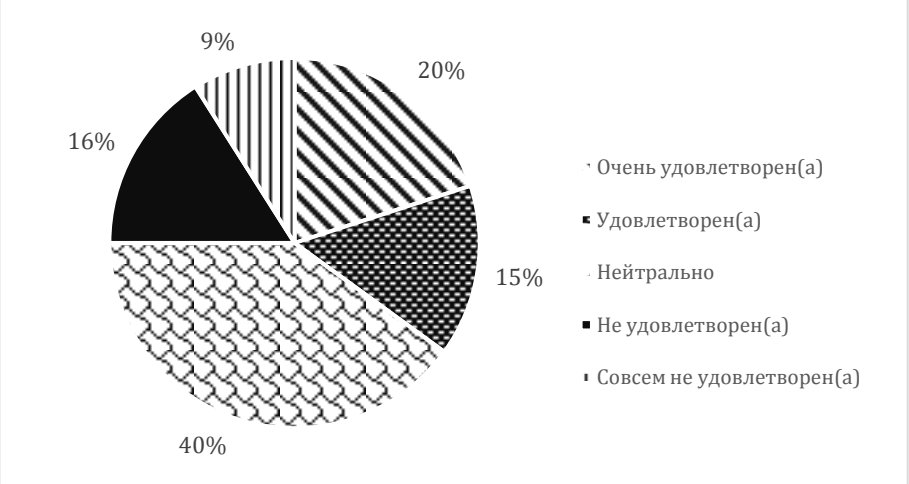


Рисунок 2 – Степень удовлетворенности посетителей салонов услуг оптики в г. Саров в 2025 г. , в %.

Как следует из рисунка 2, 20% – «очень удовлетворены», 15% – удовлетворены, 40% – относятся нейтрально, 16% – не удовлетворены и 9% – совсем не удовлетворены. То есть в среднем большая часть потребителей удовлетворена качеством приобретенной оптики в городе Саров в 2025 г., но большинству из них всё же хотелось бы повышения уровня качества предоставляемых салонами услуг оптики очков и контактных линз. Остальные же потребители

не считают оптику в Сарове качественной и, очевидно, желают значительного повышения качества предлагаемых им в салонах услуг оптики очков и контактных линз.

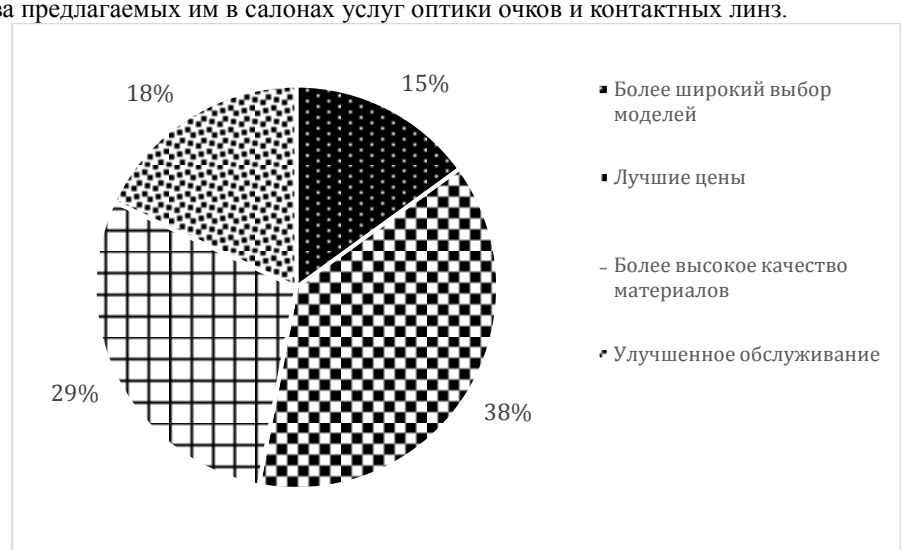


Рисунок 3 – Что бы потребители хотели улучшить в своей следующей покупке оптики в г. Саров в 2025 г., в %.

Рисунок 3 показывает: 15% респондентов хотели бы более широкого выбора моделей, 38% считают самым важным фактором лучшие цены, гарантирующие доступность покупки для всех слоев населения. 29% опрошенных в большей степени заботит более высокое качество материалов, которое на данный момент устраивает их не в полной мере, а 18% хотели бы улучшения уровня обслуживания в салонах оптики. В настоящее время персонал оптики не всегда может найти индивидуальный подход к каждому клиенту и данный аспект их работы нуждается в серьезной доработке.

По данным рисунка 4, среди посетителей оптик преобладают женщины – их 63%, а мужчин – 37%. Можно предположить, что такая ситуация складывается потому, что женщины в Сарове больше заботятся о своем здоровье, или чаще имеют проблемы со зрением, чем мужчины. Кроме того женщинам свойственно чаще менять оправу, покупать дополнительные очки, исходя из модных тенденций и личных предпочтений по дизайну и внешнему виду очков. У женщин очки, помимо функции коррекции зрения, выполняют также функцию аксессуара.

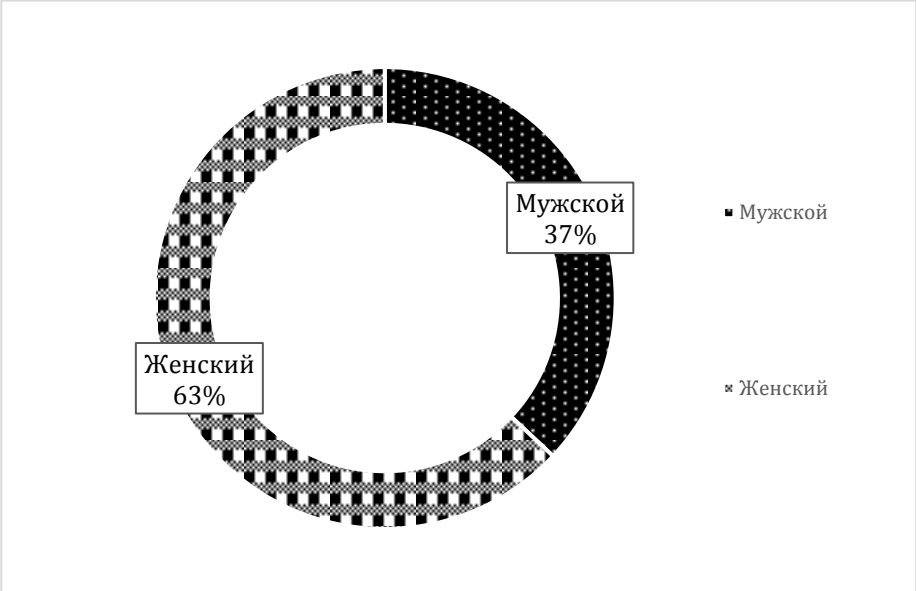


Рисунок 4 – Гендерный состав респондентов, посещающих салоны услуг оптики в г. Саров в 2025 г., в %.

В современном мире оптика играет важную роль в жизни людей, обеспечивая не только коррекцию зрения, но и являясь элементом стиля и самовыражения. В условиях растущей

конкуренции на рынке оптических услуг, понимание потребительских предпочтений и уровня удовлетворенности клиентов становится ключевым фактором для успешного функционирования салонов оптики. В 2025 году в городе Саров был проведен опрос среди жителей, целью которого было выяснить, какие характеристики товаров и услуг наиболее важны для потребителей, а также оценить уровень их удовлетворенности. На основе полученных данных, нами сделаны следующие выводы о текущем состоянии рынка оптики в данном регионе.

1. Приоритеты потребителей: результаты опроса показали, что для жителей Сарова наибольшее значение имеют цена (48%) и качество (40%) оптических товаров. Потребители ориентируются на функциональные характеристики, предпочитая доступные и качественные решения. Дизайн и бренд, напротив, имеют значительно меньшую важность, что может указывать на то, что клиенты в первую очередь рассматривают практичность и стоимость.

2. Уровень удовлетворенности: уровень удовлетворенности клиентов услугами оптики в Сарове демонстрирует разнообразие мнений: 20% респондентов удовлетворены, 15% удовлетворены в высшей степени, 40% нейтральны, 16% не удовлетворены и 9% совсем не удовлетворены. Это говорит о том, что хотя значительная часть клиентов довольна услугами, существует немалое количество людей, которые испытывают недовольство или нейтральное отношение к качеству предоставляемых услуг.

3. Анализ результатов исследования показал, что 38% респондентов считают цену самым важным фактором, это подчеркивает необходимость для салонов оптики предлагать конкурентоспособные цены. Также 29% опрошенных выражают желание видеть более высокое качество материалов, а 18% клиентов хотят улучшения обслуживания. Это свидетельствует о том, что персонал салонов оптики должен работать над индивидуальным подходом к каждому клиенту и повышением качества сервиса.

4. Гендерная структура клиентов, преобладание женщин среди посетителей оптики (63%) может быть связано с их большей заботой о здоровье и модными предпочтениями. Женщины чаще рассматривают очки не только как средство коррекции зрения, но и как стильный аксессуар. Это открывает возможности для маркетинга и разработки продуктов, ориентированных на женскую аудиторию.

5. Хотя большая часть потребителей удовлетворена качеством приобретенной оптики, многие из них все же желают повышения уровня качества предоставляемых услуг. Это подчеркивает необходимость для салонов оптики в Сарове обратить внимание на улучшение как продукции, так и обслуживания.

Таким образом, результаты опроса демонстрируют как положительные аспекты работы салонов оптики в Сарове, так и направления, требующие улучшения. Для успешного развития бизнеса важно учитывать потребности клиентов и стремиться к росту их удовлетворенности за счет повышение качества предлагаемых товаров и услуг.

Список литературы:

1. Аакер, Д. Создание сильных брендов = Building Strong Brands / Дэвид Аакер; пер. с англ. Е. Михайловой. — Москва: Олимп-Бизнес, 2016. — 384 с.
2. Котлер, Ф. Основы маркетинга = Marketing Management / Филипп Котлер ; пер. с англ. Н. Красавиной. — Москва: Вильямс, 2017. — 1072 с.
3. Манн, И. Маркетинговая машина / Игорь Манн. — Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2019. — 288 с.
4. Сергиенко, А.; Трофимов, П. Психология восприятия бренда потребителем // Практический маркетинг. — 2020. — №4. — С. 34–41.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ ЖЕНСКИХ ЗИМНИХ ПУХОВИКОВ В ГОРОДЕ САРОВ

Хижнякова Е. Д., Пасечникова Л.В., Асташкина А.М.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Маркетинговое исследование является фундаментальным инструментом для понимания закономерностей потребительского рынка и адаптации стратегий компаний к меняющимся условиям. Особую актуальность подобные исследования приобретают в условиях трансформации российского рынка после ухода ряда международных брендов, что открывает новые возможности для отечественных игроков, но требует глубокого анализа локальных

предпочтений. В данной работе представлены результаты исследования, направленного на моделирование поведения потребителей и выработку рекомендаций для бренда женской одежды Zarina на примере рынка зимних пуховиков в городе Саров.

Поведение покупателя представляет собой сложный процесс, определяемый рациональными, социальными и эмоциональными факторами. В контексте масс-маркета особое значение приобретает модель, ориентированная на поиск оптимального соотношения цены и качества. Задачей исследования являлось выявление ключевых драйверов спроса, каналов информирования и построение профиля целевого потребителя для бренда Zarina перед зимним сезоном. Эмпирической базой послужил опрос 73 жительниц города Саров, данные которого были подвергнуты статистической обработке.

Анализ каналов получения информации о новых коллекциях позволил выявить доминирующую роль цифровых платформ. Как видно из рисунка 1, основным источником сведений для потребителей являются маркетплейсы, такие как Wildberries и Ozon, которые указали 40,8% респонденток. Социальные сети брендов занимают вторую позицию (24,7%), в то время как офлайн-магазины сохраняют свою значимость преимущественно для аудитории старше 36 лет. Влияние блогеров и традиционной медийной рекламы оказалось минимальным, что свидетельствует о смещении потребительского внимания в сторону точек непосредственных продаж и официальных цифровых каналов производителя. Данная тенденция характерна для региональных рынков с высоким уровнем цифровизации повседневных потребительских практик, где доверие к агрегаторам товаров формируется за счет прозрачности отзывов и удобства сравнения предложений. При этом сохраняющаяся доля офлайн-каналов подчеркивает важность тактильного контакта с товаром для определенной, более старшей и консервативной части аудитории, для которой физическая примерка остается неотъемлемым этапом принятия решения о покупке верхней одежды.

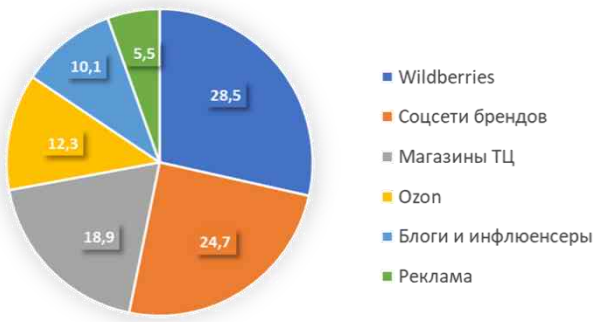


Рисунок 1 - Источники информации г. Сарова о новых коллекциях зимних женских пуховиков в 2025 г., в %

Цена выступает абсолютно критическим фактором при выборе зимней верхней одежды. Согласно результатам, для 78% опрошенных стоимость является значимым или исключительно важным критерием. При этом наблюдается ярко выраженная возрастная дифференциация в восприятии цены, что отражено на рисунке 2. Для молодых женщин до 25 лет финансовая составляющая наиболее важна (42,3% считают ее исключительно важной), тогда как для аудитории старше 45 лет ее значение существенно ниже (5,4%). Это указывает на необходимость дифференцированного подхода к ценообразованию и коммуникации для различных возрастных сегментов. Высокая чувствительность молодежи к цене объясняется, как правило, ограниченным личным бюджетом и более частым обновлением гардероба, в то время как старшая группа, обладая большей финансовой стабильностью, может позволить себе долгосрочные инвестиции в качественную вещь. Однако важно отметить, что даже для рациональной аудитории 25-35 лет цена не является единственным детерминантом; она оценивается в неразрывной связке с воспринимаемым качеством, что формирует основу модели поведения «цена-качество». Данная модель предполагает тщательное сравнение альтернатив, изучение технических характеристик (тип наполнителя, состав ткани) и активный поиск отзывов для минимизации риска неудовлетворенности покупкой.



Рисунок 2 - Важность доступной цены на женские зимние пуховики г. Сарова в 2025 г., в %

Интересные данные были получены в ходе ассоциативного опроса, направленного на выявление восприятия бренда и категории товара в целом. Результаты, представленные на рисунке 3, демонстрируют существующий разрыв в восприятии. Бренд Zarina прочно ассоциируется с модой и стилем (34,2%), что является его сильной стороной. Однако базовые ожидания от качественного зимнего пуховика сфокусированы на практических характеристиках: теплоте и комфорте (28,7%). Прямая связь между брендом и параметрами надежности или качества пока слаба (1,2%). Ключевой вывод заключается в том, что для усиления рыночных позиций бренду необходимо активнее транслировать утилитарные преимущества своей продукции, не ослабляя при этом модный образ. Этот разрыв представляет собой классическую маркетинговую проблему, когда эмоциональное позиционирование бренда не полностью покрывает функциональные потребности категории. В сознании потребителя возникает диссонанс: с одной стороны, бренд привлекателен актуальными образами, с другой — зимняя одежда покупается прежде всего для защиты от холода. Успешная стратегия в данном случае должна быть интегративной, визуально и текстуально соединяя в коммуникациях эстетику и технологичность. Например, акцент на использовании современных легких и теплых синтетических наполнителей, мембранных тканей или особых покроев, обеспечивающих свободу движения, может стать тем мостом, который соединит моду и функциональность в восприятии целевой аудитории.

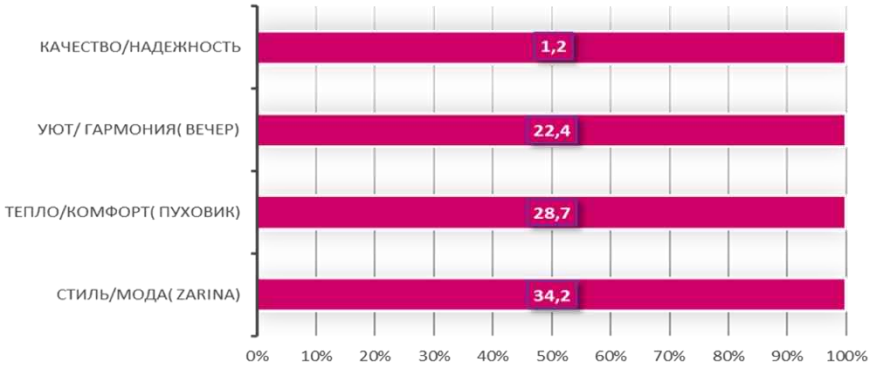


Рисунок 3 — Ассоциации потребителей с брендом Zarina и с понятием «качественный пуховик» (% от общего числа опрошенных)

Отдельного внимания заслуживают предпочтения потребителей относительно конкретных товарных характеристик, таких как длина изделия. Как продемонстрировано на рисунке 4, подавляющее большинство респонденток (43,2%) отдает предпочтение пуховикам средней длины. Длинные модели выбирают 32,1% опрошенных, а короткие — 24,7%. Такое распределение отражает запрос на универсальность: средняя длина, как правило, закрывает бедра и верхнюю часть ног, обеспечивая достаточное тепло для городских условий, но при этом не стесняет движения и подходит под большинство типов фигур. Длинные модели, обеспечивающие максимальную защиту от холода, пользуются спросом в самые морозные периоды и у потребителей, ценящих основательность и комфорт. Короткие пуховики часто ассоциируются с более спортивным или молодежным стилем и могут выбираться для активного образа жизни или в условиях более мягкой зимы. Эти данные имеют прямое

практическое значение для формирования сбалансированного ассортиментного портфеля бренда, где классические модели средней длины должны составлять его основу, а длинные и короткие версии — удовлетворять потребности специфических сегментов и погодных сценариев.

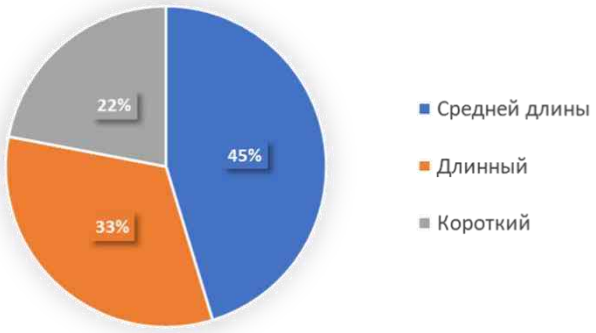


Рисунок 4 — Важность длины пуховика как значимой товарной характеристики выбора пуховика потребителями в г. Саров (% от общего числа опрошенных)

Важным аспектом исследования стал анализ ключевых факторов, влияющих на итоговое решение о покупке. Как показано на рисунке 5, цена сохраняет лидирующую позицию (35,4%), особенно в младших возрастных группах. Вторым по значимости фактором является объективная характеристика товара — состав ткани и наполнитель (28,9%), что наиболее важно для рациональной аудитории 26-45 лет. Значительное влияние на решение оказывают отзывы других покупателей (19,7%), в то время как советы консультантов и сам бренд как самостоятельный фактор выбора играют минимальную роль. Это подтверждает гипотезу о доминировании рациональной модели поведения, основанной на оценке стоимости, объективных параметров и социального доказательства. Роль пользовательского контента в данном контексте невозможно переоценить. Отзывы выполняют несколько функций: они снижают perceived risk (воспринимаемый риск) покупки, особенно при заказе онлайн, предоставляют непредвзятую, с точки зрения потребителя, информацию о качестве пошива, посадке по фигуре, истинных тепловых свойствах и долговечности изделия. Таким образом, управление репутацией на маркетплейсах и в социальных сетях превращается из вспомогательной активности в ключевой канал коммуникации и инструмент продаж. Низкая значимость бренда как самостоятельного фактора характерна для сегмента масс-маркета, где лояльность сформирована слабо, а конкуренция высока. Потребитель рассматривает бренд не как самоценность, а как один из атрибутов товара, который должен подтверждаться конкретными потребительскими свойствами и положительными оценками других покупателей.

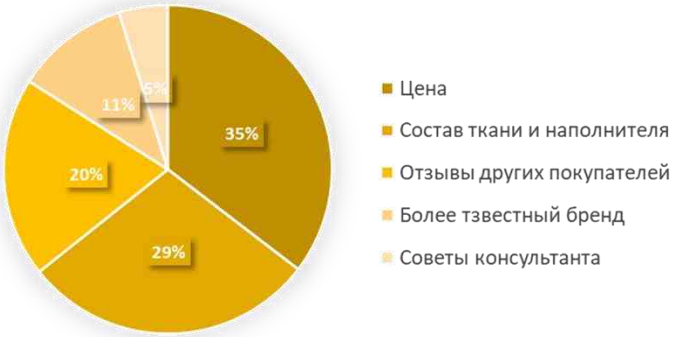


Рисунок 5 – Ключевые факторы выбора женского зимнего пуховика г. Сарова в 2025 г., в %

Таким образом, результаты исследования позволяют сформулировать конкретные рекомендации для бренда Zarina. В ассортиментной политике следует сделать ставку на оптимальное сочетание цены, тепла и легкости, расширить размерную сетку и формировать базовый ассортимент вокруг моделей средней длины, наиболее востребованных в регионе. В коммуникационной стратегии необходимо преодолеть разрыв между модным имиджем и

базовыми ожиданиями, активно продвигая практичные характеристики товара. Основными каналами продвижения должны оставаться маркетплейсы и социальные сети бренда с акцентом на работу с пользовательскими отзывами как ключевой формой социального доказательства. Реализация данных мер позволит бренду эффективнее адаптироваться к региональным особенностям спроса и укрепить свои позиции на локальном рынке.

Список литературы:

1. Беарден, У.О. Поведение потребителей: пер. с англ. / У.О. Беарден, Л.Б. Каплан. — М.: Вильямс, 2018. — 432 с. — ISBN 978-5-8459-2124-3.
2. Котлер, Ф. Основы маркетинга / Ф. Котлер, Г. Армстронг. — 18-е изд. — Москва.: Вильямс, 2023. — 752 с. — ISBN 978-5-8459-2312-4.
3. Малхотра, Н. Маркетинговые исследования. Практическое руководство / Н. Малхотра. — 6-е изд. — Москва.: Вильямс, 2021. — 960 с. — ISBN 978-5-8459-2278-3.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ МУЖСКОЙ СПОРТИВНОЙ ОБУВИ В Г. САРОВ В 2025 Г.

Демин Д.Л., Пасечникова Л.В., Самофал А.С.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Современная экономическая реальность характеризуется устойчивым переходом от рынка производителя к рынку потребителя. Ключевым фактором успеха компаний становится не только качество продукта, но и глубокое, детализированное понимание потребностей, мотиваций и поведенческих паттернов своих клиентов. В условиях высокой конкуренции и цифровизации эмпирические данные о потребителе превращаются в стратегический актив. Особенно это важно для сегментов массового спроса, к которым, безусловно, относится рынок спортивной обуви, давно вышедший за рамки узкоспециализированного спортивного инвентаря.

Моделирование покупательского поведения – это комплексный процесс создания абстрактного представления (модели) о процессе принятия потребителем решения о покупке. В современном маркетинге это не просто статичное описание этапов, а скорее создание динамической карты, учитывающей множество переменных: от глубинных психологических установок и ценностей до мимолетного влияния цифрового контента, рекомендаций социального окружения и контекстной рекламы.

Нами было проведено исследование с целью анализа структуры и ключевых факторов, определяющих потребительский выбор на рынке мужской спортивной обуви в городе Саров в 2025 году. Город Саров, являясь наукоградом с особым статусом, представляет собой специфическую локацию с характерной социально-демографической структурой (высокая доля квалифицированных специалистов, научных работников, относительно стабильный уровень доходов), что делает его репрезентативной моделью для изучения потребительского поведения в подобных закрытых административно-территориальных образованиях (ЗАТО) и городах с высокой концентрацией IT- и научного сектора.

Первый ключевой вывод исследования касается мотивации покупки. Результаты анкетирования показали четкое разделение:

1) 60% респондентов покупают мужскую спортивную обувь в первую очередь для повседневной носки.

2) 40% ориентированы на прямое использование для занятий спортом.

Полученное распределение красноречиво свидетельствует о глубокой интеграции кроссовок и кед в повседневный гардероб современного мужчины. Спортивная обувь трансформировалась из узкофункционального атрибута в символ комфорта, удобства, динамичного образа жизни и современного урбанистического стиля. Однако спортивная функция не теряет своей значимости для существенной доли потребителей.

Рынок предпочитаемых брендов в г. Саров демонстрирует (см. рисунок 1)

- Абсолютное лидерство принадлежит двум глобальным гигантам: Nike (36%) и Adidas (30%). Коллективно они контролируют 66% предпочтений, что говорит об исключительно успешном, десятилетиями выстраиваемом брендинге, высоком уровне узнаваемости, доверия к качеству и воспринимаемом статусе.

- Puma (16%) уверенно занимает третье место, позиционируясь как стильная и технологичная альтернатива. - Reebok (10%) показывает относительно слабый результат, что

может указывать на недостаточную активность на локальном рынке или несоответствие текущего позиционирования запросам аудитории.

- Категория «Другое» (8%), куда вошли, в частности, New Balance, Demix и другие бренды, подтверждает наличие устойчивого, хотя и ограниченного, спроса на альтернативные, часто более нишевые или ценовые предложения.

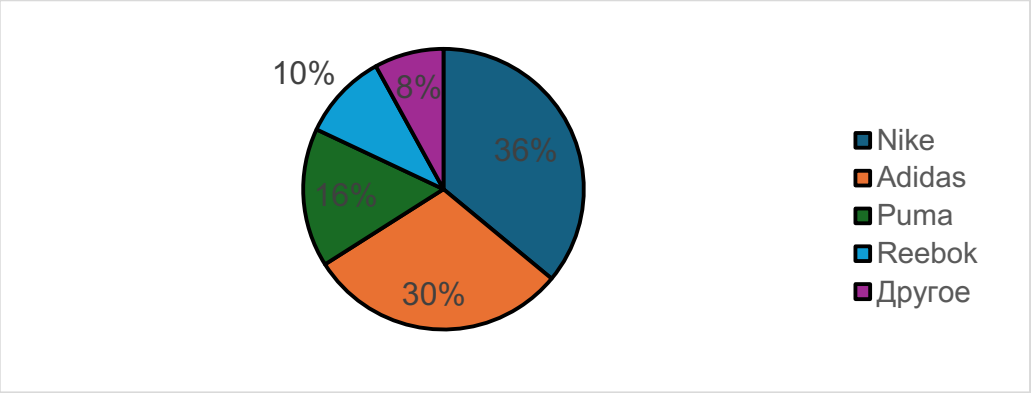


Рисунок 1 – Лидерство брендов мужской спортивной обуви в г. Саров в 2025 г., в %

Сложившаяся структура предпочтений создает высокий барьер для входа новых игроков. Успех на рынке для брендов, не входящих в топ-2, связан с необходимостью четкой дифференциации (технологии, уникальный дизайн, фокус на конкретный вид спорта, ценовое преимущество) и усиленной коммуникационной работой.

Исследование выявило (см. рисунок 2) четкую структуру предпочтений в каналах дистрибуции.

1. Специализированные розничные магазины (40%) - безусловный лидер. В эту категорию входят как мультибрендовые сети (например, «Спортмастер»), так и монобрендовые магазины (Nike, Adidas). Их Преимущества: возможность примерить, оценить качество «вживую», получить консультацию продавца, мгновенное получение товара. Это канал, где важна тактильность и немедленное удовлетворение потребности.
2. Крупные интернет-маркетплейсы (30%) - Wildberries, Ozon и аналоги уверенно занимают второе место. Ключевые характеристики: широта ассортимента и возможность сравнивать предложения разных продавцов и брендов на одной платформе, удобный и мощный поиск, часто более выгодные цены и регулярные акции сформировавшееся доверие к платформе как гаранту, высокая скорость и предсказуемость доставки.
3. Официальные сайты брендов (20%). Этот канал выбирает меньшинство, часто это более лояльные и информированные потребители, ищущие конкретные новинки, эксклюзивные коллаборации или уверенные в подлинности и условиях гарантии только при покупке «из первых рук».
4. Рынки (10%) - наименьшая доля, что объясняется основными барьерами: недоверие к подлинности и качеству продукции, отсутствие гарантий, слабый сервис и современные потребительские привычки, сместившиеся в сторону цивилизованной розницы.

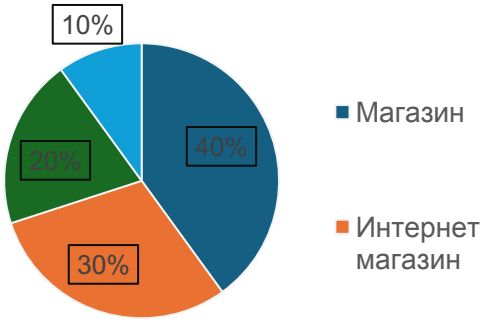


Рисунок 2 - Место покупки мужской спортивной обуви в г. Саров в 2025 г., %

На основе анализа средних баллов восприятия ключевых атрибутов мужской спортивной обуви потребителями г. Сарова выявлены следующие тенденции (см. рисунок 3). Для каждого параметра респонденты ставили оценку от 1 до 5. Чем ниже средний балл, тем ближе восприятие к хорошему качеству параметра и наоборот.

1. Наиболее позитивно оцениваемым параметром является удобство (средний балл 1,88). Данный результат свидетельствует о высоком соответствии продукции своей базовой функциональной задаче — обеспечению комфорта в процессе эксплуатации, что можно считать её ключевым конкурентным преимуществом в восприятии целевой аудитории.
2. Восприятие стиля носит неоднозначный характер (средний балл 2,42). Несмотря на общую положительную оценку, данный атрибут уступает удобству по степени консенсуса среди респондентов.
3. Параметр долговечности получил нейтрально-негативную оценку (средний балл 2,88). В потребительском восприятии продукция склонна ассоциироваться с ограниченным сроком службы. Подобная оценка может быть обусловлена спецификой используемых облегченных материалов и конструкций, ориентированных на оптимизацию веса и комфорта, потенциально в ущерб износостойкости.
4. Ценовой параметр занимает промежуточную позицию (средний балл 2,7). Восприятие стоимости является умеренным, что позволяет предположить, что потребители в целом признают соотношение цены, удобства и дизайна, однако их оценка может быть скорректирована с учетом сомнений в долговечности товара.

Таким образом, потребительское восприятие формирует иерархию атрибутов, где безусловный приоритет отдается функциональному комфорту, в то время как такие характеристики, как дизайн и особенно долговечность, требуют более детального изучения и, возможно, корректировки в рамках продуктовой политики.

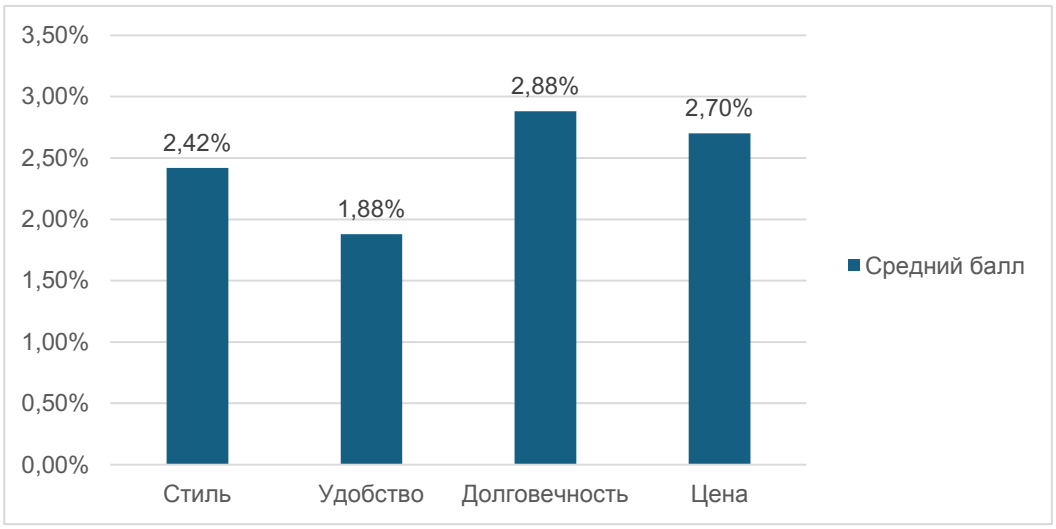


Рисунок 3 - Основные предпочитаемые респондентами параметры мужской спортивной обуви в г. Саров в 2025 г., в %

На основе всех полученных результатов нами была разработана комплексная модель (см. рисунок 4), которая описывает процесс от получения стимула до реакции потребителя по классической схеме «Стимул – Процесс принятия решения – Реакция».

Проведенное исследование позволило построить детализированную модель, описывающую портрет и поведенческий путь потребителя мужской спортивной обуви в г. Саров. Это рационально-эмоциональный, информированный и практичный человек. Он ценит комфорт и качество, но при этом внимателен к дизайну и брендовой атрибутике. Его покупка – это взвешенное решение, на которое влияют как личный опыт и советы окружения, так и активный цифровой поиск.

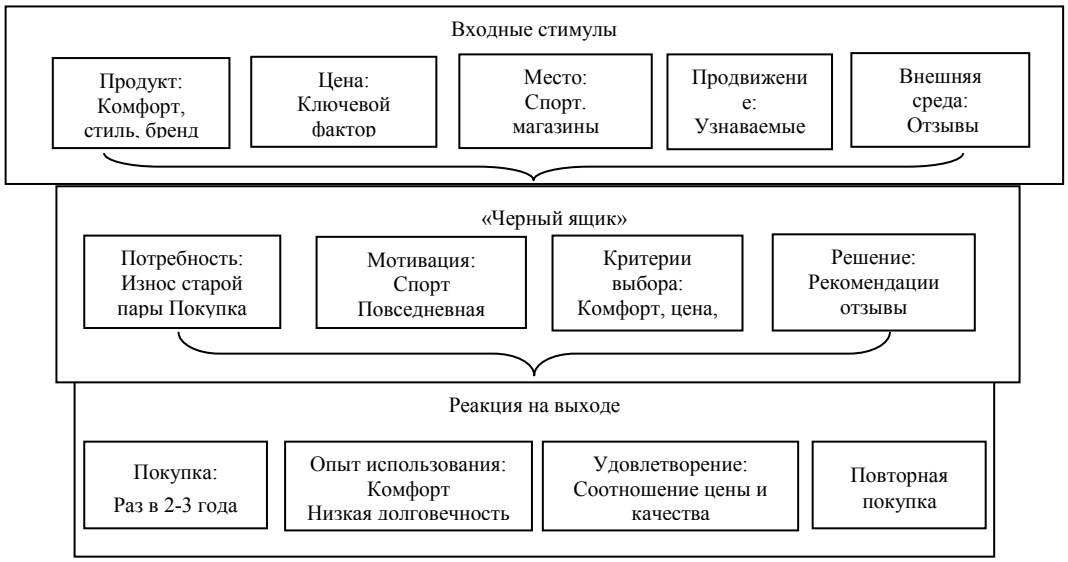


Рисунок 4 - Модель покупательского поведения на рынке мужской спортивной обуви в г. Саров в 2025 г.

Список литературы:

1. Котлер, Ф. Основы маркетинга / Ф. Котлер, Г. Армстронг. — Москва : Вильямс, 2021. — 752 с. — ISBN 978-5-9908911-7-4.
2. Кузьмина, Е. Е. Маркетинг : учебник и практикум для вузов / Е. Е. Кузьмина. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Юрайт, 2023. — 431 с. — ISBN 978-5-534-15821-9.
3. Лукичева, Т. А. Маркетинг : учебник и практикум для вузов / Т. А. Лукичева [и др.] ; под ред. Т. А. Лукичевой, Н. Н. Молчанова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Юрайт, 2023. — 386 с. — ISBN 978-5-534-14869-2.
4. Резник, Г. А. Маркетинг : учебное пособие / Г. А. Резник. — Москва : ИНФРА-М, 2021. — 199 с. — ISBN 978-5-16-015274-0.
5. Соловьев, Б. А. Управление маркетингом: Модульный подход : учебник / Б. А. Соловьев, Л. А. Мешкова. — Москва : ИНФРА-М, 2021. — 523 с. — ISBN 978-5-16-012345-8.

МАРКЕТИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ РЕСТОРАНОВ В Г. САРОВ

Пичагина Ю.А., Пасечникова Л.В., Ометова О.Н.
Саровский физико-технический институт — филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В условиях локального рынка закрытого административно-территориального образования (ЗАТО) понимание потребительских предпочтений становится критически важным для ресторанного бизнеса. Целью исследования является моделирование покупательского поведения на рынке ресторанов г. Саров, выявление ключевых факторов выбора и разработка практических рекомендаций для повышения конкурентоспособности заведений. На основе анкетирования 420 жителей города построена поведенческая модель и сформулированы стратегические предложения для рестораторов.

Город Саров, будучи ЗАТО и научным центром, обладает уникальной социально-демографической структурой: высокий процент научных сотрудников, ограниченное предложение ресторанных услуг и тесные социальные связи. Эти особенности формируют специфические модели потребительского поведения, требующие отдельного изучения.

Исследование основано на количественном онлайн-опросе (N=420) жителей г. Саров в возрасте 18–60 лет. Выборка репрезентативна по полу, возрасту и социально-профессиональному статусу. Данные обработаны в MS Excel с применением частотного, сравнительного и кросс-табличного анализа.

Доминирующей целью посещения ресторана является социальное взаимодействие. Это подтверждает высокую роль ресторанов как места для досуга и общения в условиях закрытого города.

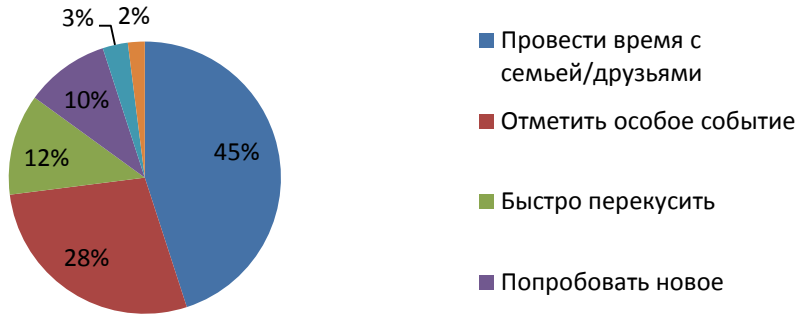


Рисунок 1 – Основные цели посещения ресторанов в г. Саров в 2025 г., в %

Как следует из рисунка 1, для 45% респондентов, посещающих ресторан, это общение с семьёй/друзьями, для 28% — празднование особого события, для 12% — быстрый перекус.

Анализ ценовой готовности (см. рисунок 2) показал концентрацию основного спроса в среднем ценовом сегменте. Для 71% респондентов комфортный чек на одного человека находится в диапазоне от 800 до 2500 руб.

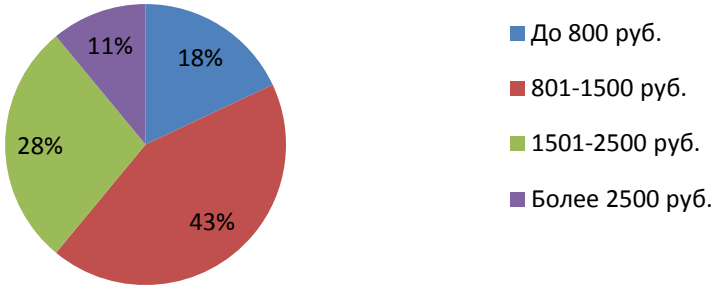


Рисунок 2 – Готовность респондентов тратить на один визит (на человека) в ресторан в г. Саров в 2025 г., %

Результаты изучения факторов выбора одного и того же ресторана респондентами г. Сарова представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Факторы, больше всего влияющие на решение о повторном посещении ресторан в г. Саров в 2025 г., в %

Главной причиной вернуться в ресторан для подавляющего большинства является вкус и качество еды и напитков (78%). На втором месте с большим отрывом – вежливость персонала (12%). Цены, расположение и акции как факторы возврата имеют значительно меньший вес.



Рисунок 4 – Источники информации о ресторанах в г. Саров в 2025 г., в %

Предпочтения респондентов в части получения информации о ресторанах г. Сарова не являются особо взыскательными (см. рисунок 4). «Сарафанное радио» остается самым влиятельным каналом информации в закрытом сообществе. Рекомендации друзей и знакомых являются основным источником сведений о ресторанах для 61% респондентов.

На основе полученных данных разработана модель, отражающая взаимосвязь между потребителем, стимулами ресторана и итоговым решением.

Составленная нами модель (рисунок 5) наглядно демонстрирует структурированный подход к анализу и практическому применению данных о покупательском поведении на рынке ресторанных услуг города Саров. В её основе лежат две взаимодополняющие аналитические модели, построенные на данных опроса 420 респондентов. Первая — это модель процесса принятия решения, адаптированная версия классической модели EKB, которая описывает поэтапный путь потребителя от момента возникновения желания посетить заведение до формирования устойчивой лояльности. Модель включает пять ключевых этапов: осознание потребности (преимущественно социальной или событийной), поиск информации (где доминирует «сарафанное радио» — рекомендации друзей и знакомых), оценку альтернатив по жёсткой иерархии критериев (соотношение цена-качество, соответствие цели визита, наличие гигиенических факторов, таких как чистота и вежливый персонал), принятие решения (на которое сильно влияют ситуационные помехи, например, отсутствие свободных столиков) и, наконец, постпосещенческое поведение, где лояльность формируется только через многократное подтверждение ожидаемого соотношения цены и качества, а опыт активно обсуждается в социальном круге.

Вторая ключевая модель (таблица 1), разработанная нами по итогам полученных результатов анкетирования — сегментационная матрица потребителей г. Сарова, которая делит целевую аудиторию на четыре чёткие группы на основе двух осей: главного мотива посещения и чувствительности к балансу «цена-качество».

Таблица 1 - Сегментационная матрица посетителей ресторанов г. Сарова

Сегмент	Критерии (данные опроса)	Доля	Ключевые драйверы	Модель принятия решения
«Социальные традиционалисты»	Цель: семья/друзья (45%). Чек: 801-2500 руб. Важны: качество, атмосфера.	~35%	Безопасность выбора, комфорт для общения, стабильность.	Привычное решение. Сильная лояльность. Выбор из 1-3 проверенных мест.
«Искатели повода»	Цель: событие (28%). Чек: 1501-2500+ руб. Важны: атмосфера, новизна.	~25%	Уникальный опыт, «вау-эффект», произвести впечатление.	Расширенное решение. Активный поиск. Низкая лояльность, высокая вовлеченность.

«Прагматичные перекусывающие»	Цель: быстро перекусить (12%). Важны: скорость (3.8 балла), цена. Чек: до 1500 руб.	~20%	Эффективность, удобство, экономия времени и денег.	Ограниченное решение. Оценка по 2-3 утилитарным критериям. Лояльность к формату.
«Неактивные / Критичные»	Посещают реже раза в месяц (30%). Считают цены высокими (из общего 67%).	~20%	Считают посещение неоправданной тратой. Нет подходящего предложения.	Отсутствие активного процесса. Требуется мощный внешний стимул для запуска цикла.

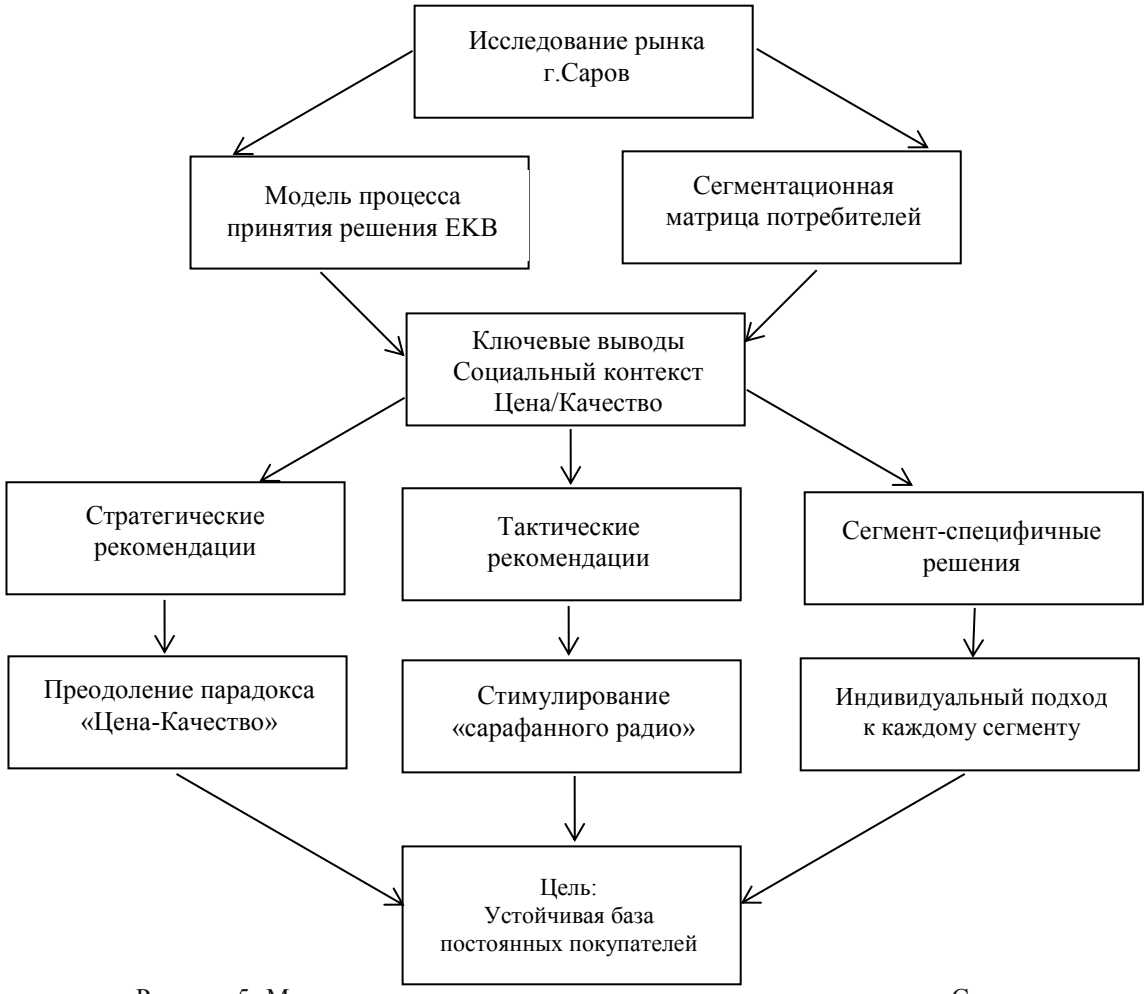


Рисунок 5 -Модель покупательского поведения на рынке ресторанов г. Саров

Выделяются следующие сегменты: «Социальные традиционалисты» (около 35%), которые посещают рестораны в первую очередь для общения с семьёй и друзьями, ценят безопасность выбора, комфорт и стабильность, демонстрируют высокую лояльность к проверенным местам. «Искатели повода» (около 25%), приходящие отметить особое событие, ориентированные на уникальный опыт, «вау-эффект» и производство впечатления, для которых характерны активный поиск и низкая лояльность. «Прагматичные перекусывающие» (около 20%), цель которых — быстро перекусить, а ключевые драйверы — эффективность, удобство и экономия времени и денег, они принимают решения на основе ограниченного набора утилитарных критериев. И, наконец, «Неактивные/Критичные» (около 20%), которые посещают рестораны реже раза в месяц, считают цены завышенными и не видят подходящего предложения, что требует для их вовлечения мощного внешнего стимула.

Синтез выводов из обеих моделей позволил выявить фундаментальные особенности локального рынка г.Саров. К ним относятся абсолютное доминирование социальных связей и «сарафанного радио» как основного канала информации, что сводит на нет эффективность традиционной рекламы, а также ключевой парадокс рынка — устойчивое восприятие цен как завышенных на фоне высоких требований к качеству еды и напитков как главного фактора лояльности. Также отмечена лояльность к ограниченному кругу заведений-лидеров и умеренная важность расположения ресторана из-за компактности города.

Проведённое исследование подтвердило специфику покупательского поведения на рынке ресторанов г. Саров, где доминируют социальные связи и высокие требования к качеству при критическом восприятии цен. Построенная модель и предложенные рекомендации позволяют рестораторам целенаправленно корректировать маркетинговые стратегии, усиливать лояльность клиентов и повышать конкурентоспособность в условиях закрытого локального рынка.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на углублённую сегментацию аудитории с применением кластерного анализа и изучение влияния цифровых платформ на формирование потребительских решений.

Список литературы:

1. Борзенина, А.Н. Культурное пространство современного потребительского общества // Международный научный журнал «Слово в науке». – 2022 - №7. – 8 с.
2. Галимова, Л. Н., Павлова А. В. Особенности потребительского поведения на рынке услуг общественного питания в моногороде // Экономика и бизнес: теория и практика. — 2022. — № 12-2. — С. 54-58. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://cyberleninka.ru/journal/article/osobennosti-potrebitelskogo-povedeniya-na-rynke-uslug-obschestvennogo-pitaniya-v-monogorode (дата обращения: 21.05.2024).
3. Ерохина, Л.Д., Федоров, А.А. Влияние социальных онлайн-медиа на потребительские предпочтения молодежи возрастной категории 22-25 лет // Социодинамика. – 2022. - №9. – С. 4-7.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ СЕРВИСОВ В Г. САРОВ В 2025 Г.

Солдатов С.Д., Пасечникова Л.В., Додин А.А.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Современная экономическая реальность характеризуется не только переходом к рынку потребителя, но и стремительной цифровой трансформацией, в центре которой оказываются технологии искусственного интеллекта. Ключевым фактором успеха компаний в этой сфере становится не только мощь алгоритмов, но и глубокое, детализированное понимание потребностей, барьеров и поведенческих паттернов своих пользователей. В условиях формирующегося высококонкурентного рынка нейросетевых инструментов эмпирические данные о потребителе превращаются в критически важный стратегический актив. Особенно это значимо для B2C-сегмента, где сервисы на основе ИИ перестали быть уделом энтузиастов и превратились в массовый продукт для решения повседневных и профессиональных задач.

Моделирование покупательского поведения в цифровой сфере — это комплексный процесс создания абстрактного представления (модели) о процессе принятия пользователем решения о начале использования, выборе и оплате цифрового сервиса. В современном маркетинге это создание динамической карты, учитывающей множество переменных: от уровня цифровой грамотности и профессиональных потребностей до влияния экспертных обзоров, рекомендаций профессиональных сообществ и контекстной рекламы в цифровой среде.

Нами было проведено исследование с целью анализа структуры и ключевых факторов, определяющих потребительский выбор на рынке платных и условно-бесплатных потребительских нейросетевых сервисов (таких как ChatGPT, Midjourney, Claude, отечественные аналоги и т.д.) в городе Саров в 2025 году. Город Саров, являясь наукоградом с особой интеллектуальной и профессиональной структурой (высокая доля инженеров, научных работников, IT-специалистов), представляет собой уникальную локацию с повышенным спросом на инновационные цифровые инструменты. Это делает его репрезентативной моделью для изучения потребительского поведения в закрытых административно-территориальных

образованиях (ЗАТО) и городах с высокой концентрацией технологически подкованной аудитории.

Первы ключевой вывод исследования касается целей использования нейросетей. Результаты анкетирования показали четкое разделение по основным целям:

31% респондентов используют нейросетевые сервисы в первую очередь для профессиональных и образовательных задач (написание и анализ текстов, генерация кода, подготовка презентаций, исследовательская работа).

21% ориентированы на творческие и развлекательные цели (генерация изображений и музыкальных треков, написание сценариев, создание игрового контента).

17% используют нейросети как инструмент для решения бытовых и рутинных задач (составление писем, планирование, поиск и структурирование информации).

Полученная структура красноречиво свидетельствует о восприятии нейросетей прежде всего как продукта, интегрированного в профессиональную и учебную деятельность. В то же время значительная доля пользователей нейросетей только осваивает их творческий потенциал, что указывает на расширение границ применения технологии.

Рынок сервисов в г. Саров демонстрирует (см. рисунок 1) поляризованную структуру. Абсолютное лидерство принадлежит глобальному гиганту: ChatGPT (OpenAI) (54%). Его доминирование объясняется эффектом первенства, широчайшей узнаваемостью, постоянным развитием функционала и формированием экосистемы. Он стал нарицательным именем для категории.

GitHub Copilot (17%) уверенно занимает второе место, являясь фактически монополистом в своей нише — генерации высококачественных изображений по текстовому запросу. Его успех построен на узкой специализации и выдающемся качестве результата.

Категория «Отечественные аналоги» (YandexGPT, GigaChat и др.) (11%) показывает значительный результат, что подчеркивает важность факторов локализации, языковой специфики, а также соображений цифрового суверенитета для части аудитории.

Категория «Другое» (Claude, Copilot и пр.) (4%) подтверждает наличие спроса на альтернативные, часто более специализированные или интегрированные в другие платформы предложения.

Сложившаяся структура предпочтений создает высокий барьер для входа новых глобальных игроков. Успех на рынке для альтернативных сервисов связан с необходимостью четкой дифференциации (уникальная специализация, интеграция в популярные рабочие среды, ценовое преимущество, фокус на приватность).

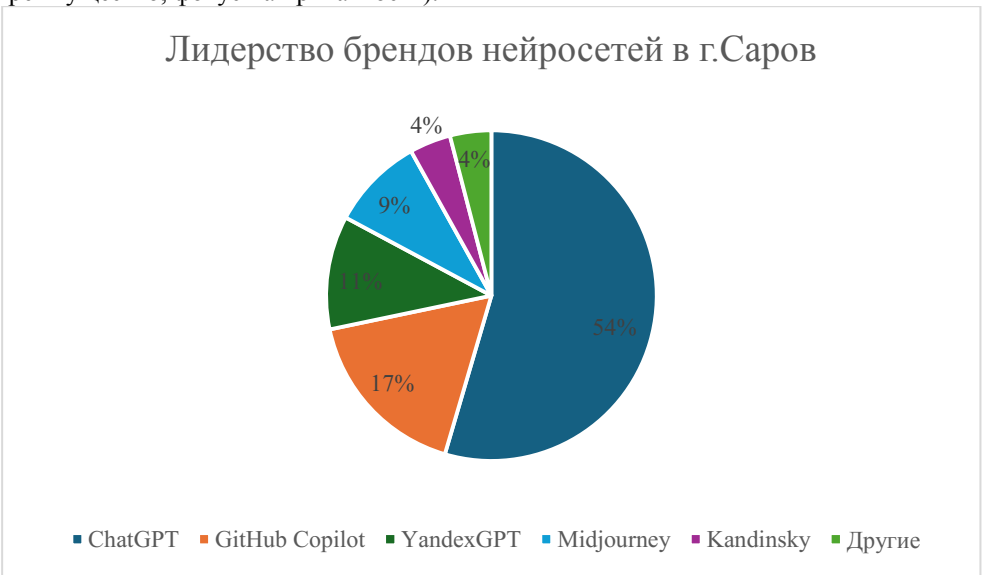


Рисунок 1 – Предпочтения нейросетевых сервисов среди пользователей г. Сарова в 2025 г., в %

Исследование выявило (см. рисунок 2) структуру предпочтений в моделях доступа и оплаты. Бесплатные (ограниченные) версии (57%) – наиболее популярный вариант. Пользователи активно используют квоты бесплатных запросов, что свидетельствует как о

желании протестировать функционал, так и о неготовности части аудитории к регулярной подписке, если базовых возможностей хватает для их задач.

Ежемесячную/ежегодную подписку (премиум-доступ) (40%) – выбирают наиболее активные и профессионально заинтересованные пользователи, для которых ограничения бесплатного тарифа являются критическим барьером. Ключевые драйверы: снятие лимитов, доступ к более мощным моделям, приоритет в очереди, расширенные функции.

Покупка разовых пакетов токенов/запросов (14%) – нишевая модель для пользователей с нерегулярной, но ресурсоемкой потребностью.

Корпоративный доступ (через работодателя/вуз) (3%) – отражает растущий интерес организаций к интеграции ИИ-инструментов в рабочие процессы.

На основе анализа средних баллов восприятия ключевых атрибутов нейросервисов пользователями г. Сарова выявлены следующие тенденции (см. рисунок 3).



Рисунок 2 – Модели оплаты и доступа к нейросетевым сервисам в г. Саров в 2025 г., %

Преобладает осторожный оптимизм (61%) респондентов (50%+11%) видят в нейросетях положительный потенциал для общества. Несмотря на все текущие проблемы («галлюцинации», сложность использования), большинство пользователей верят, что в конечном итоге технология принесет больше пользы, чем вреда. Можно смело говорить о будущих перспективах и долгосрочных выгодах, так аудитория в целом готова к этому позитивному нарративу.

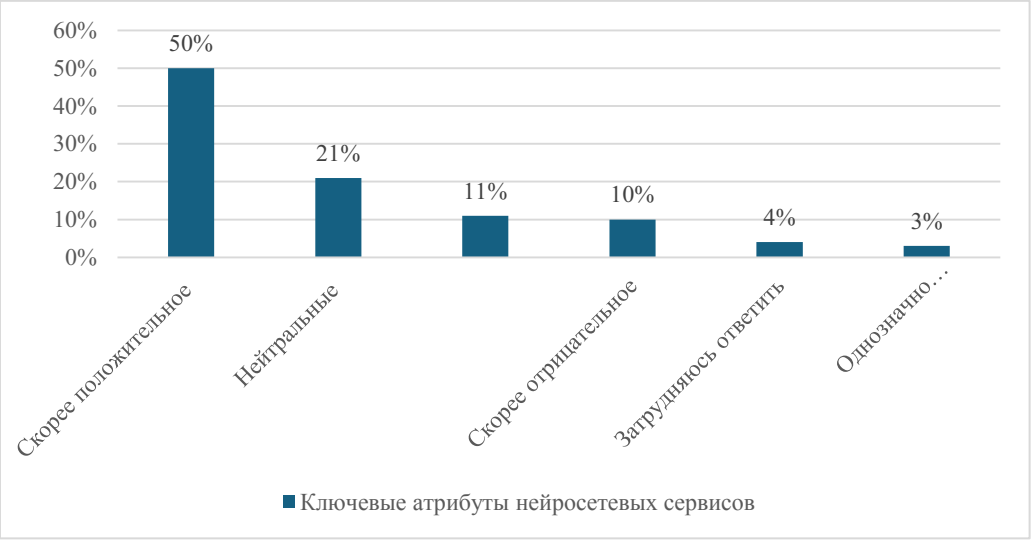


Рисунок 3 – Восприятие ключевых атрибутов нейросетевых сервисов в г. Саров в 2025г.

Значительный процент скептически настроенных граждан (13%) респондентов (10%+3%) ожидают от нейросетей скорее отрицательного влияния. В городе с высоким процентом технически подкованных специалистов существует осознанную оппозиция развитию ИИ. Их опасения, вероятно, связаны с рисками для занятости, этическими дилеммами или потенциальным злоупотреблением технологий.

Таким образом, потребительское восприятие формирует иерархию, где базовые требования к скорости и простоте удовлетворены, в то время как качество результата, ценовая политика и гарантии конфиденциальности остаются областями для конкурентной борьбы и улучшения.

На основе всех полученных данных нами была разработана комплексная модель (см. рисунок 4), которая описывает процесс от осознания потребности до лояльности пользователя.

Модель включает этапы: 1) Осознание технологической возможности/проблемы (профессиональная необходимость, любопытство); 2) Активный цифровой поиск и оценка (чтение обзоров, сравнение функций и цен, тестирование бесплатных версий); 3) Принятие решения о выборе сервиса и модели доступа (влияние рекомендаций коллег, соотношение цена/качество, специфические потребности); 4) Использование и оценка опыта; 5) Формирование лояльности или переход к альтернативе (на основе удовлетворенности качеством, стоимостью и этическими аспектами).

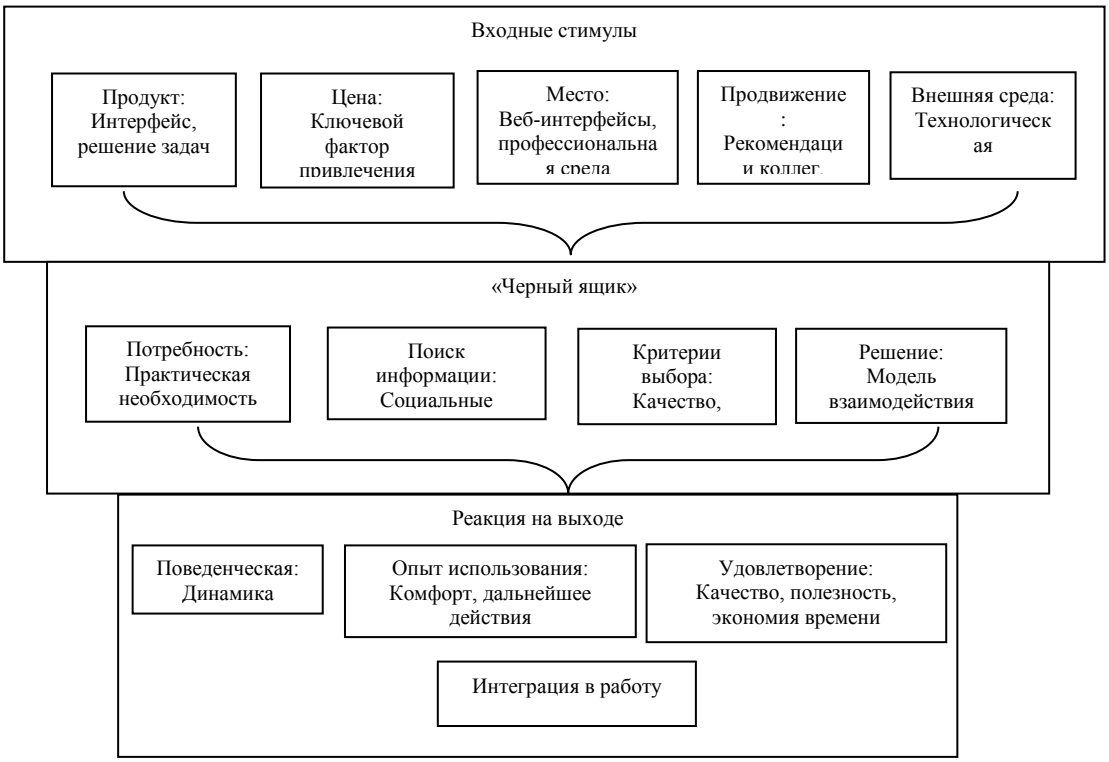


Рисунок 4 – Модель поведения пользователя на рынке нейросетевых сервисов в г. Саров в 2025 г.

Проведенное исследование позволило построить детализированный портрет потребителя нейросетевых сервисов в г. Саров. Это рациональный, технологически компетентный и требовательный пользователь. Он воспринимает нейросеть прежде всего как инструмент для повышения личной или профессиональной эффективности. Его выбор — это взвешенное решение, на которое влияют экспертные оценки, опыт референтной группы (коллег, сообществ), прямое тестирование функционала, а также серьезное отношение к вопросам стоимости и цифровой приватности. Для компаний-провайдеров ключевыми направлениями развития на подобных рынках являются: углубление персонализации, создание прозрачной и гибкой ценовой политики, усиление коммуникации вокруг безопасности данных и развитие узкоспециализированных профессиональных решений.

Список литературы:
1. Аакер, Д.А. Стратегическое рыночное управление / Д.А. Аакер. — 10-е изд. — Санкт-Петербург : Питер, 2020. — 496 с. — ISBN 978-5-4461-1439-5.
2. Ассаэль, Г. Поведение потребителей и стратегия маркетинга / Г. Ассаэль. — 10-е изд. — Санкт-Петербург : Питер, 2019. — 576 с. — ISBN 978-5-4461-1154-7.
3. Брынджолфссон, Э. Машина, платформа, толпа: Наше цифровое будущее / Э. Брынджолфссон, Э. Макфи. — Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2021. — 384 с. — ISBN 978-5-00169-245-8.
4. Воронцов, К.В. Лекции по искусственному интеллекту и машинному обучению: учебное пособие / К.В. Воронцов. — Москва : МФТИ, 2022. — 412 с.
5. Голубков, Е.П. Маркетинговые исследования: теория, методология и практика / Е.П. Голубков. — 5-е изд., перераб. и доп. — Москва : Финпресс, 2018. — 496 с. — ISBN 978-5-8001-0106-3.

МАРКЕТИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ КОФЕЕН В Г. САРОВ

Калашникова А.Ю., Юткина Е.Г.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В условиях современного рынка, характеризующегося высоким уровнем конкуренции, для кофейного бизнеса понимание потребительских предпочтений и мотиваций становится ключевым фактором успеха. Данная статья посвящена исследованию процесса принятия решения потребителем при выборе кофейни, с акцентом на рынок г. Саров. Целью работы является построение модели потребительского поведения и разработка практических рекомендаций для повышения эффективности маркетинговых усилий кофейных заведений.

На основе анализа литературных источников и результатов проведенного автором исследования была разработана концептуальная модель, отражающая основные группы факторов, влияющих на выбор кофейни потребителем. В центре модели находится сам потребитель, чье решение обусловлено комплексом внутренних и внешних факторов. К внутренним факторам относятся потребности и мотивы (утоление голода/жажды, социализация, работа), восприятие кофейни (личный опыт, отзывы, репутация), личные предпочтения (тип кофе, кухня, атмосфера) и финансовые возможности. Внешние факторы подразделяются на контролируемые и неконтролируемые кофейней.

Контролируемые факторы (маркетинговые) включают качество продукта (кофе, напитки, еда), ценовую политику, расположение и доступность (транспорт, парковка), а также продвижение (реклама, социальные сети, программы лояльности).

Неконтролируемые факторы (факторы среды) включают культурные и социальные нормы, мнение референтных групп (друзья, семья, блогеры), уровень конкуренции и экономическую ситуацию.

Для достижения поставленной цели было проведено маркетинговое исследование в форме анкетного опроса, в котором приняли участие 30 потребителей кофеен г. Саров. Анализ полученных данных позволил оценить текущее состояние рынка, выявить ключевые предпочтения целевой аудитории и сформулировать практические рекомендации.

Рынок кофеен в г. Саров достаточно развит и характеризуется наличием постоянных клиентов.

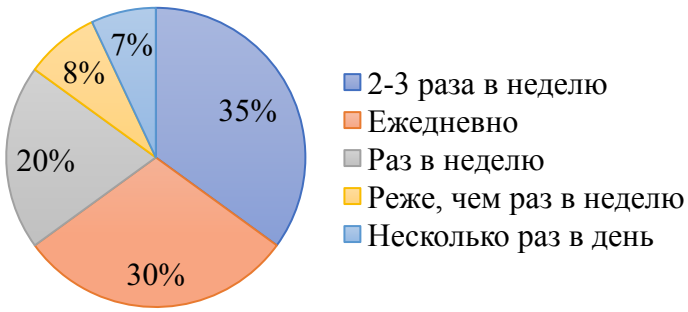


Рисунок 1 – Частота посещений потребителями кофеен г. Сарова в 2025 г., в %

Как видно из рисунка 1 на рынке кофеен наибольшую долю составляют респонденты, посещающие кофейни 2-3 раза в неделю. Значительная часть, посещают кофейни ежедневно, что свидетельствует о том, что для многих кофе стал неотъемлемой частью повседневного ритуала, возможно, по пути на работу или во время перерыва. Кроме того, 20% респондентов посещают кофейни раз в неделю, вероятнее всего, по выходным или в свободное время. Небольшая часть опрошенных посещают заведения реже одного раза в неделю, и только 7% опрошенных посещают кофейни несколько раз в день. Это говорит о том, что они относятся к лояльным поклонникам кофейни или испытывают потребность в частом потреблении кофе в течение дня. Полученные данные позволяют сделать вывод о наличии стабильного спроса на услуги кофеен в городе Саров. При разработке маркетинговых стратегий важно учитывать этот фактор и в большей степени ориентироваться на постоянных клиентов, разрабатывая для них привлекательные условия.

При анализе факторов, определяющих выбор кофейни, становится очевидной ориентация потребителей на качество продукта и атмосферу заведения. Из всех предложенных параметров наиболее высокую оценку (см. рисунок 2) получили качество кофе (4,6 балла) и атмосфера и интерьер (4,3).

Результаты опроса показывают, что 30% респондентов готовы платить больше при улучшении качества продукции (см. рисунок 3). Это подчеркивает высокую значимость данного фактора для потребителей. Столько же респондентов (30%) охотно увеличат свои расходы при проведении интересных акций и специальных предложений. Это свидетельствует о том, что, предоставляя выгоду в виде скидок, бонусов или уникальных предложений, можно стимулировать посетителей тратить больше в кофейне.

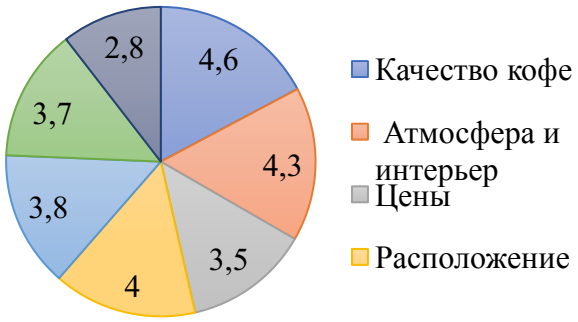


Рисунок 2 – Определяющие факторы при выборе кофейни потребителями в г. Саров в 2025 г., в баллах

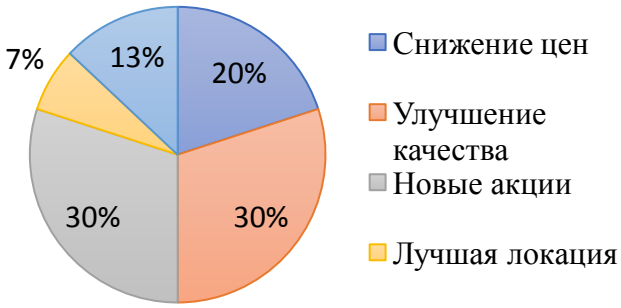


Рисунок 3 – Готовность потребителей тратить больше в кофейнях г. Саров в 2025 г., в %

Изучение частоты приобретения дополнительных товаров (рисунок 4) позволяет оценить потенциал увеличения выручки кофеен за счет стимулирования импульсных покупок. Результаты опроса показали, что более половины респондентов (57%) иногда покупают дополнительные товары при покупке кофе. Это говорит о том, что стимулирование спонтанных желаний - эффективный инструмент для увеличения доходности кофейного бизнеса. 36% опрошенных регулярно совершают дополнительные покупки, что свидетельствует об их лояльности и готовности тратить больше. И только 7% респондентов никогда не покупают ничего дополнительно, что может быть связано с их строгим бюджетом или отсутствием

интереса к предлагаемым товарам. Таким образом, становится ясно, что кофейням следует активно предлагать посетителям сопутствующие товары, такие как десерты, выпечку, снеки и другие, для увеличения прибыли, объемов выручки и удовлетворения различных потребностей клиентов.

На основе полученных данных была разработана модель покупательского поведения (см. рисунок 5), демонстрирующая взаимосвязь между потребителем, стимулами кофейни и итоговым решением о покупке.

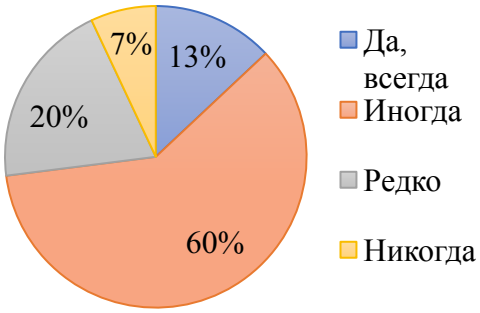


Рисунок 4 – Покупка дополнительных товаров потребителями кофеен г. Саров в 2025 г., в %

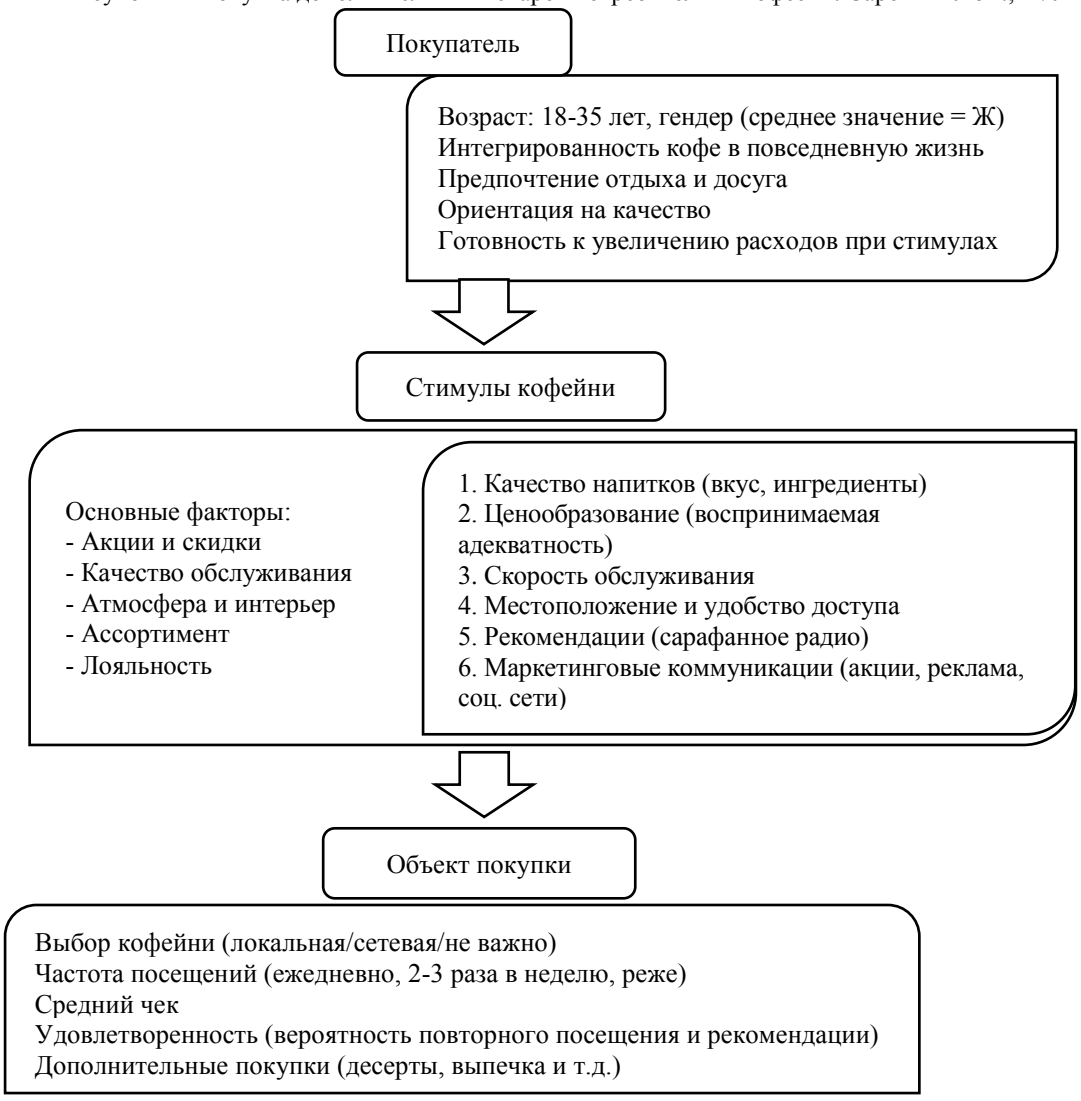


Рисунок 5 – модель покупательского поведения на рынке кофеен в г. Саров

Структура модели состоит из трех ключевых элементов:

Покупатель: в нашей модели это типичный представитель целевой аудитории – активный горожанин в возрасте 25-35 лет. Он ценит качественный продукт, уютную атмосферу и удобное расположение. Его основная мотивация при посещении кофейни – возможность пообщаться с друзьями, отдохнуть от повседневной суеты и насладиться вкусом любимого напитка.

Стимулы кофейни - это факторы, которые кофейня может контролировать и использовать для привлечения и удержания клиентов. Они включают в себя цену на напитки и еду, качество продукции (в первую очередь, кофе), уровень обслуживания, интерьер и общую атмосферу заведения, расположение и удобство, а также наличие и привлекательность программы лояльности. Эти стимулы оказывают непосредственное влияние на решение покупателя.

Объект покупки - это итоговое решение, которое принимает покупатель. Решение включает в себя выбор конкретной кофейни, частоту посещений и размер среднего чека. К примеру, покупатель может выбрать кофейню 'X', посещать ее два раза в неделю и тратить в среднем 400 рублей за один визит. Данная модель позволяет нам лучше понять, какие факторы являются наиболее важными для потребителя при выборе кофейни, и на что следует обратить особое внимание при разработке маркетинговых стратегий.

Результаты исследования подтвердили важность качества кофе, атмосферы и ценовой политики для привлечения и удержания клиентов. На основе проведенного исследования нами предложены следующие практические рекомендации для кофеен г. Саров: ориентироваться на качество напитков, атмосферу и удобное местоположение; разрабатывать программы лояльности и акции, стимулирующие посещения кофеен; проводить гибкую ценовую политику и предлагать доступные варианты; активно использовать социальные сети и "сарафанное радио".

Понимание мотивации и предпочтений потребителей является необходимым условием для успешного развития кофейного бизнеса в условиях высокой конкуренции. Разработанная модель покупательского поведения позволяет кофейням г. Саров более эффективно реагировать на изменение потребностей своей целевой аудитории, разрабатывать целевые маркетинговые программы и повышать свою конкурентоспособность.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния цифровых технологий и онлайн-платформ на выбор кофейни потребителем.

Список литературы:

1. Блэкуэлл, Р. Поведение потребителей: Учебник / Р.Блэкуэлл, П.Миниард, Дж.Энджел.— Москва: Питер, 2007. — №10. - С. 111-128. - ISBN 978-5-469-00677-0
2. Жук, В.И. Модели поведения потребителей на рынке товаров и услуг // Экономика и банки. – 2008. – С. 26-29.
3. Лысова, Е.А. Поведение потребителей: содержание понятия, социально-экономическая сущность // Вестник Воронежского государственного университета: серия экономика и управление. - 2019. - № 4. - С. 21-27.
4. Неганов, С.А. Потребительское поведение: новые сферы исследования
5. Прозорова, А.В. Психологические аспекты поведения потребителей: понятие, значение для микроэкономического анализа // Экономика и социум.- 2021. - №12. - С. 711-716.
6. Фролов, Д.А. Модели потребительского поведения // Экономика и социум. - 2022. - №6. – С. 725-727.

МАРКЕТИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ НА РЫНКЕ ДОСТАВКИ БЫСТРОЙ ЕДЫ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА САРОВ

Новиков А.Г., Пасечникова Л.В., Овсянникова Л.В.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В условиях цифровизации и высокой конкуренции в сегменте общественного питания ключевым фактором успеха становится глубокое понимание потребительского поведения. На примере города Саров было проведено маркетинговое исследование, позволившее выявить специфические предпочтения жителей, оценить зрелость рынка и разработать практическую модель поведения потребителей, а также сформулировать конкретные рекомендации для операторов.

Рынок доставки быстрой еды является одним из самых динамичных и конкурентных. Для устойчивого развития компаниям необходимо не только фиксировать текущие тренды, но и

прогнозировать реакцию аудитории на изменения в сервисе, ассортименте и коммуникациях. Маркетинговое исследование, проведенное нами в г. Саров, наглядно показывает, как глобальные тенденции (цифровизация, внимание к качеству) преломляются в условиях локального рынка.

В исследовании приняли участие 87 пользователей услуг доставки еды в г. Саров. Анализ полученных данных позволил оценить текущее состояние рынка, выявить ключевые паттерны поведения и сформулировать адресные рекомендации для бизнеса.

По данным рисунка 1 видно,что сформировалось ядро лояльных пользователей - 44% заказывают еду несколько раз в неделю, что свидетельствует о глубокой интеграции сервисов доставки в повседневную жизнь. Всего 3% никогда не пользовались услугой - рынок достиг высокого уровня проникновения. Ежедневные пользователи (9%) представляют особую ценность для сервисов как источник стабильного дохода.

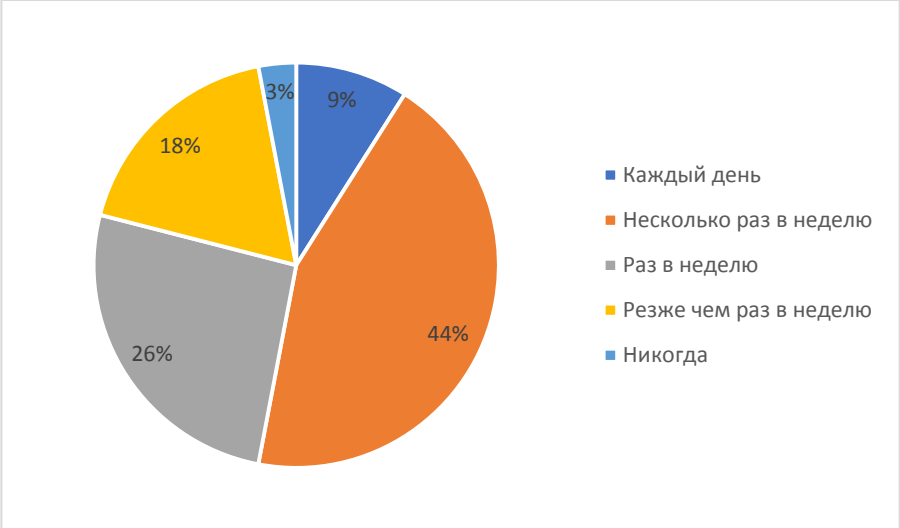


Рисунок 1 - Частота использования респондентами услуг доставки быстрой еды в г.Саров в 2025 г., в %

Обращаясь к рисунку 2 видно, что явное доминирование пиццы и суши (74% суммарно) формирует специализацию местного рынка. Низкий спрос на здоровое питание (3%) при этом создает потенциал для нишевых игроков. Возможно, существующие предложения в сегменте здорового питания не соответствуют ожиданиям или недостаточно продвигаются.

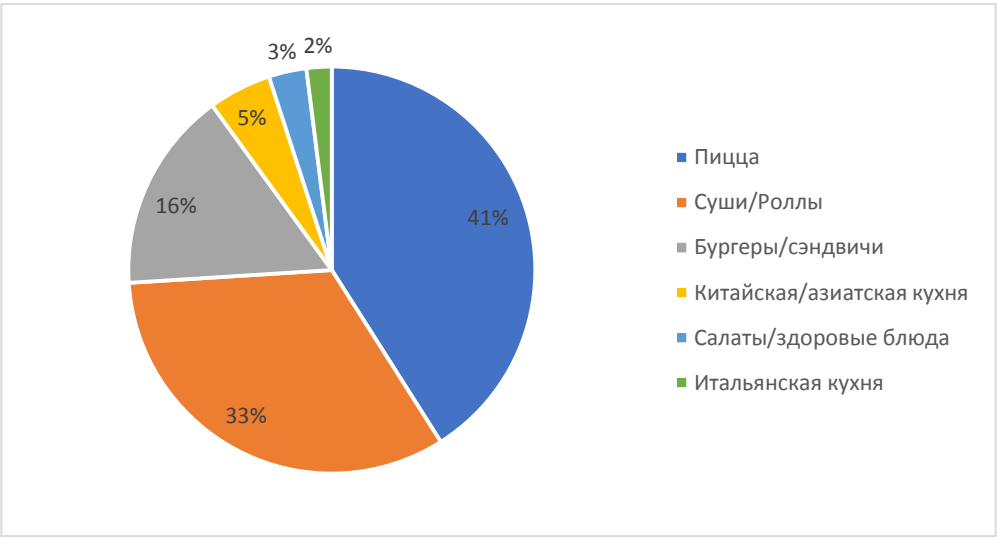


Рисунок 2 - Виды блюд, которые чаще всего заказывают через доставку в г. Саров в 2025 г, в %

Согласно рисунку 3, лидерство "Автосуши Автопицца" демонстрирует успех модели универсального сервиса. При этом суммарная доля мелких операторов (20%) показывает, что

рынок оставляет пространство для специализированных игроков. Конкуренция сосредоточена в среднем ценовом сегменте.

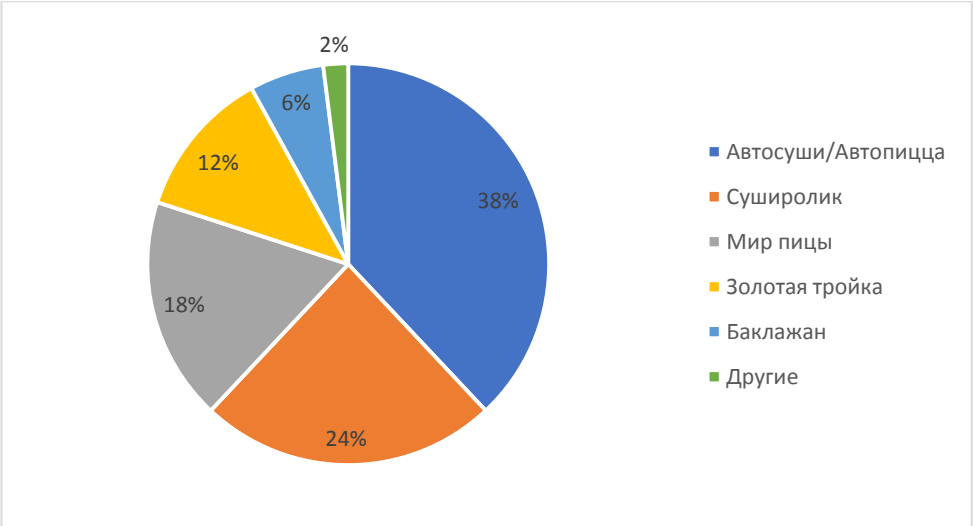


Рисунок 3 - Сервисы доставки, которые используют чаще всего в г. Саров в 2025 г, в %

Разработанная нами алгоритм-модель потребительского поведения на рынке быстрой доставки еды (см. рисунок 4) представляет собой циклическую систему с ярко выраженными точками концентрации внимания потребителя. Для рынка г. Саров наиболее значимыми являются этапы цифрового взаимодействия (поиск и заказ) и физического подтверждения качества (исполнение и потребление). Успешная компания должна управлять вниманием клиента на всех этапах, обеспечивая:

1.Прозрачность и предсказуемость на этапе поиска (четкие сроки, реальные фото, честные цены).

2.Бесперебойность и простоту в цифровом канале.

3.Бесшовный переход из онлайн-заказа в офлайн-получение с высоким уровнем сервиса.

4.Активацию положительной обратной связи внутри локального цифрового сообщества города.

Данная модель служит основой для последующего эмпирического исследования, в рамках которого будут верифицированы выделенные гипотезы о значимости тех или иных факторов для жителей г. Саров.

Полученные результаты имеют прямую практическую значимость для повышения конкурентоспособности сервисов доставки. Модель и данные исследования указывают на конкретные направления для улучшения: необходимость закрыть разрыв между ожидаемым и реальным качеством продуктов, оптимизировать логистику для соблюдения заявленных сроков, развивать удобство цифровых платформ и внедрять программы лояльности, отвечающие запросам платежеспособной аудитории.

Таким образом, работа не только вносит вклад в теорию моделирования потребительского поведения на примере специфического локального рынка, но и предоставляет его участникам научно обоснованный инструмент для анализа аудитории, прогнозирования ее реакции и принятия эффективных маркетинговых решений в условиях высокой конкуренции и цифровой трансформации.

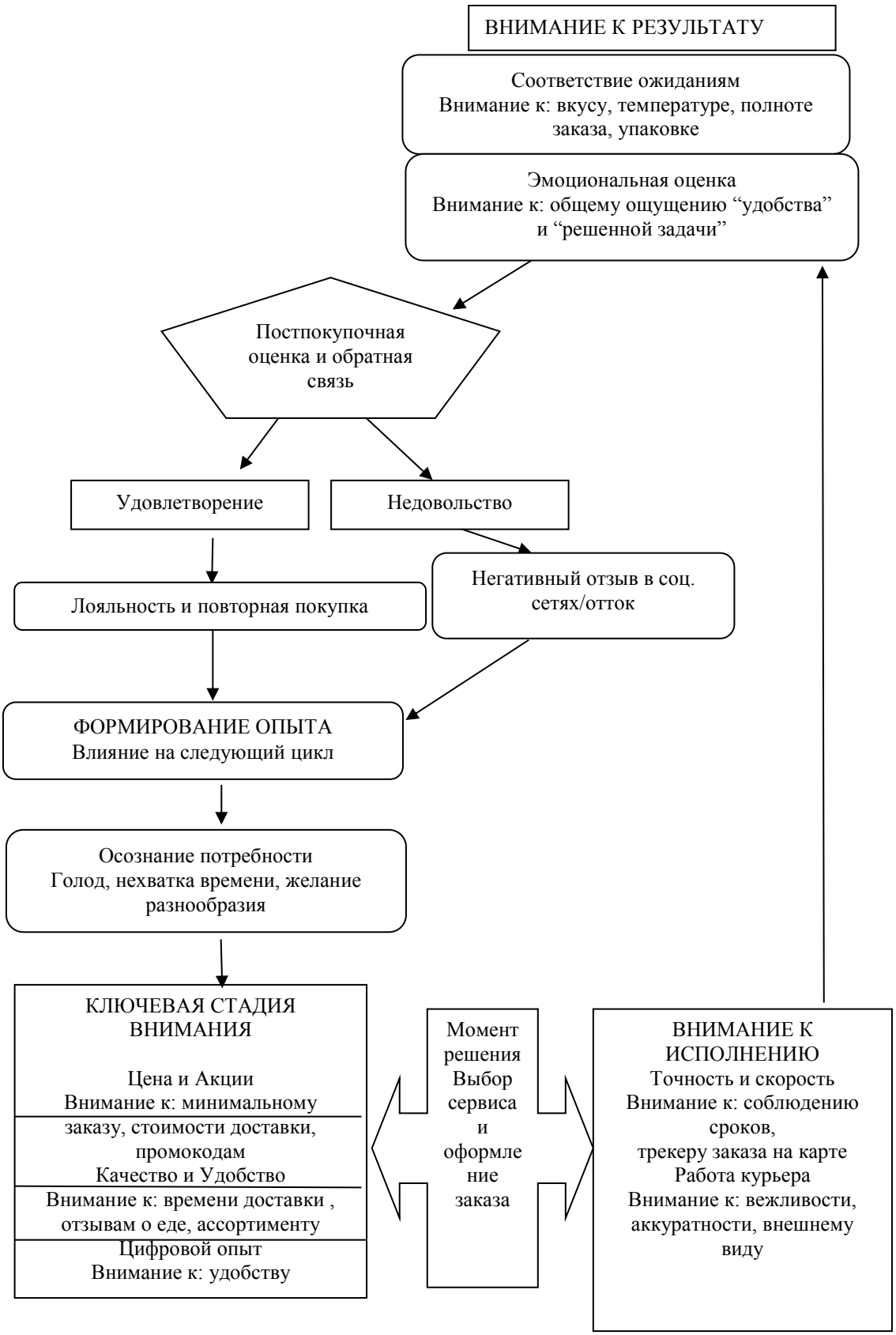


Рисунок 4. Алгоритм-модель покупательского поведения на рынке услуг доставки быстрой еды в г. Саров

Список литературы:

1. Аакер, Д. А. Стратегическое рыночное управление / Д. А. Аакер. — Санкт-Петербург: Питер, 2012. — 496 с. — ISBN 978-5-459-01089-9
2. Алешина, И. В. Поведение потребителей: Учебное пособие / И. В. Алешина. — Москва: ФАИР-ПРЕСС, 2006. — 384 с. — ISBN 5-8183-1024-7
3. Блэкуэлл, Р. Поведение потребителей: Учебник / Р. Блэкуэлл, П. Миниард, Дж. Энджел. — Москва: Питер, 2007. — №10. — С. 111-128. — ISBN 978-5-469-00677-0
4. Котлер, Ф. Маркетинг менеджмент: Экспресс-курс / Ф. Котлер. — Санкт-Петербург: Питер, 2019. — 496 с. — ISBN 978-5-4461-1135-4
5. Леви, М. Розничная торговля: стратегический подход / М. Леви, Б. А. Вейтц. — Москва: Вильямс, 2018. — 1184 с. — ISBN 978-5-8459-2020-9
6. Соломон, М. Р. Поведение потребителей: Искусство и наука побеждать на рынке / М. Р. Соломон. — Москва: Олимп-Бизнес, 2017. — 768 с. — ISBN 978-5-9693-0402-4

Секция «Безопасность информационных и технических систем»

АНТИКРИЗИСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Мотина А.С., Самсонова Д.А.
Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В современной динамичной и нестабильной экономической среде кризисы превратились в постоянный фактор давления на организации. Традиционные методы антикризисного управления, основанные на реактивном подходе (стратегии, при которой действия начинаются только после того, как кризис уже наступил или стал очевидным) и опыте прошлого, зачастую не успевают за скоростью развития кризисных ситуаций. На этом фоне технологии искусственного интеллекта (ИИ) становятся критически важным инструментом, переводящим антикризисное управление на качественно новый уровень - от реагирования к предсказанию и профилактике.

Антикризисное управление — это комплекс мер, направленных на прогнозирование, предотвращение, преодоление кризисных явлений и минимизацию их негативных последствий. Его ключевые этапы включают:

- мониторинг и диагностику;
- прогнозирование;
- планирование и принятие решений;
- реализацию мер;
- контроль и восстановление.

Современные вызовы, такие как глобализация поставок, киберугрозы, информационная перегрузка, пандемии и волатильность рынков, требуют обработки огромных массивов данных (Big Data) в режиме реального времени, что невозможно без применения высоких технологий.

На этапе мониторинга и диагностики ИИ выступает как система круглосуточного сенсорного восприятия организации. Вместо выборочного ручного анализа отчётов или оценивания, алгоритмы машинного обучения (ML) и обработки естественного языка (NLP) непрерывно сканируют тысячи источников данных: от показателей IoT-датчиков на оборудовании и транзакционных потоков до новостных лент, социальных сетей, геоданных и даже спутниковых снимков. ИИ не просто собирает информацию, но и проводит её первичную диагностику, выявляя аномалии, кластеризуя угрозы по типам (финансовые, операционные, репутационные) и присваивая им предварительные оценки критичности. Например, система может автоматически зафиксировать резкий рост негативных упоминаний компании в региональных пабликах или обнаружить отклонение в режиме работы ключевого станка, что для человека могло бы остаться незамеченным в общем потоке данных.

Переход к этапу прогнозирования с использованием ИИ знаменует собой переход от вопроса «что произошло?» к вопросу «что может произойти?». На основе исторических данных о прошлых кризисах, банкротствах, сбоях поставок алгоритмы машинного обучения выявляют сложные, нелинейные паттерны и строят вероятностные модели. Например, модель может спрогнозировать вероятность дефолта основного поставщика не по формальной отчётности, которая часто запаздывает, а по косвенным признакам: задержкам оплаты мелких счетов, всплеску активности на сайтах вакансий в его компании. Более того, технологии цифровых двойников (Digital Twins) позволяют проводить сценарное моделирование: создаётся виртуальный прототип бизнес-процесса (например, цепочки поставок), на котором в режиме симуляции проигрываются различные кризисные ситуации (тайфун в регионе, забастовка в порту, введение санкций) и мгновенно оцениваются их потенциальные последствия для компании.

Этап планирования и принятия решений под воздействием ИИ перестаёт быть областью интуитивных решений. Здесь в полной мере раскрывается потенциал прескриптивной аналитики, когда ИИ не только прогнозирует угрозу, но и предлагает конкретные, оптимизированные варианты действий для её нейтрализации. Система, спрогнозировав срыв поставок от ключевого партнёра, может автоматически сгенерировать несколько сценариев ответа: рассчитать оптимальный размер страховки, предложить альтернативных поставщиков с учётом их текущей загрузки и надёжности, а также смоделировать финансовые последствия каждого варианта. Таким образом, руководитель получает не просто сигнал о проблеме, а готовый набор обоснованных решений, прошедших первичную оценку эффективности и

затратности. Это резко сокращает время на обсуждения и позволяет сосредоточиться на стратегическом выборе, а не на рутинном анализе.

Реализация мер в условиях применения ИИ приобретает скорость и точность, недоступные традиционным методам. Многие рутинные, но критически важные операции делегируются интеллектуальным системам. Яркий пример - автоматизированное реагирование на кибератаки в рамках платформ SOAR (Security Orchestration, Automation and Response). При обнаружении аномалии в сетевом трафике ИИ-система за миллисекунды изолирует заражённые сегменты, блокирует вредоносные IP-адреса и оповещает аналитиков, тогда как человеку на это потребовались бы минуты или часы. В логистике роботизированные системы, управляемые ИИ, могут автоматически перенаправлять грузы, перезаключать договоры с резервными перевозчиками и обновлять производственные графики, минимизируя простои. ИИ здесь выступает как беспристрастный и неутомимый исполнитель, чьи действия основаны исключительно на данных и заданных алгоритмах минимизации ущерба.

Наконец, на этапе контроля и восстановления ИИ обеспечивает замыкание петли обратной связи и создание самообучающейся антикризисной системы. После реализации ответных мер ИИ продолжает мониторить ключевые показатели, оценивая эффективность принятых решений. Он анализирует, как быстро стабилизируются финансовые потоки, восстанавливается репутационный индекс, нормализуются операционные процессы. Все данные о прохождении кризиса от первых сигналов до финальных результатов используются для дообучения моделей. Это позволяет системе «извлекать уроки» из каждого инцидента, уточняя паттерны раннего предупреждения и улучшая рекомендации на будущее. Организация не просто возвращается к докризисному состоянию, а выходит из ситуации более устойчивой, с обновлённым и более точным механизмом антикризисного управления.

Типы кризисов и примеры ИИ-решений:

A. Финансовые кризисы и риски неплатежей: SAS Anti-Money Laundering. Выявление сложных схем отмывания денег и мошенничества в реальном времени; строит графики связей между контрагентами, помогая избежать регуляторных кризисов и штрафов.

B. Операционные кризисы и сбои в цепях поставок: Coupa Risk Aware. Агрегирует данные из тысяч источников (новости, соцсети, погода, санкции) по контрагентам, присваивает оценку риска и предупреждает о проблемах заранее.

C. Репутационные и социальные кризисы: Cision. Отслеживает упоминания бренда, выявляют рост негативной тональности и фейковых новостей, позволяя PR-команде подготовить ответ до эскалации. Glint (анализ вовлеченности сотрудников через NLP) - выявляет «горячие точки» недовольства и прогнозируют риски массовых увольнений.

D. Киберугрозы: Darktrace. Создает «цифровую ДНК» каждого пользователя и устройства, при аномалии (например, ночное скачивание файлов) автономно изолирует угрозу и замедляет атаку.

Внедрение технологий искусственного интеллекта преобразует антикризисное управление из функции затрат в источник стратегического преимущества. Результаты проявляются на трех уровнях: операционном, тактическом и стратегическом.

На операционном уровне достигается кардинальный рост скорости анализа и принятия решений — временной горизонт сокращается с часов до минут и даже секунд. ИИ способен обрабатывать нечеловеческие объёмы данных из разнообразных источников, что принципиально недоступно традиционным методам. Кроме того, алгоритмы не подвержены усталости, панике или когнитивным искажениям, что ведёт к значительному снижению человеческих ошибок.

Тактические преимущества выражаются в повышении точности прогнозов. Система выдаёт не размытое предупреждение «будет кризис», а конкретную оценку: например, «вероятность 87%, что через два месяца поставщик X задержит поставки, что приведёт к потерям N млн рублей в день». Это позволяет оптимизировать ресурсы и напрямую влиять на EBITDA, находя наименее затратные пути решения проблем. Автоматизация рутинных операций высвобождает дорогостоящих экспертов - кризисных менеджеров и риск-аналитиков - для действительно сложных стратегических задач.

На стратегическом уровне компании с ИИ-системами управления рисками формируют конкурентное преимущество и повышают инвестиционную привлекательность: они получают более высокие кредитные рейтинги и снижают стоимость страхования. Достигается сохранение репутации за счёт предвидения кризиса до его выхода в публичное поле либо скоординированной, быстрой реакции на основе данных, которая минимизирует ущерб.

Наконец, развивается культура управления, основанная на данных: решения принимаются на основе моделей и симуляций, а не «на глаз» или по иерархии, что снижает внутренние конфликты и повышает качество стратегического планирования на всех уровнях.

В 2024 году российскими исследователями проведен анализ внедрения технологий искусственного интеллекта в антикризисное управление на уровне организаций. В основе анализа лежал индекс интеллектуальной зрелости, характеризующий готовность компаний использовать ИИ для диагностики, прогнозирования и преодоления кризисных ситуаций. Наиболее высокий уровень интеллектуальной зрелости демонстрируют отрасли, наиболее чувствительные к кризисам: финансовый сектор (банки, страховые компании), топливно-энергетический комплекс и обрабатывающая промышленность. Эти отрасли первыми внедряют ИИ для прогнозирования рисков, предиктивной аналитики и сценарного моделирования кризисов. технологии искусственного интеллекта применяются в четырех ключевых антикризисных функциях: анализ внешней среды (мониторинг рыночных угроз, прогнозирование спроса, отслеживание конкурентов), диагностика внутреннего потенциала (оценка финансового состояния, прогнозирование отказов оборудования), выработка решений (сценарное моделирование, оптимизация стратегий реструктуризации, автоматизация рутинных операций) и апостериорный анализ (установление причин кризисов для их предотвращения в будущем).

Сбер использует порядка 50 ИИ-моделей в кредитовании, анализируя транзакционную, поведенческую активность и взаимосвязи между юридическими лицами. Внедрение графовой аналитики позволило выйти на новый уровень выявления рисков. Как заявил первый зампред правления Александр Ведяхин, внедрение ИИ в оценку экономического положения банков является «критически важным» для стресс-тестирования и предиктивной аналитики. Сбер предложил клиентам оптимизацию бизнеса с помощью ИИ. В интернет-банке «СберБизнес» запущен Giga-ассистент на базе GigaChat, который анализирует выручку и средний чек, разрабатывая пошаговые планы. На энергоблоке № 6 Нововоронежской АЭС введена в опытную эксплуатацию система информационной поддержки оператора (СИПО), охватывающая 360 технологических систем. Искусственный интеллект прогнозирует развитие события на 30 минут вперед, позволяя предотвратить внеплановый останов энергоблока. В жилищно-коммунальном хозяйстве «Росатом Инфраструктурные решения» внедрил системы, которые с помощью ИИ анализируют данные по расходу воды. Это позволяет выявлять предаварийные состояния за 3–12 часов до их наступления, предотвращая порывы и отключения потребителей.

Наряду с возможностями, использование ИИ в антикризисном управлении сопряжено с серьезными рисками. Основная проблема - качество данных. Если алгоритмы обучают на неполных, искажённых или предвзятых данных, их прогнозы и рекомендации будут ошибочными, что в кризис может привести к катастрофе. Так же барьером является «чёрный ящик»: модели не объясняют, как пришли к решению. В чрезвычайной ситуации руководители не станут слепо доверять непонятной рекомендации, что парализует процесс. Это же создаёт юридическую проблему ответственности за последствия.

Сами ИИ-системы становятся новой мишенью для кибератак. Злоумышленники могут отравить данные, обмануть алгоритм или взломать его, превратив главный инструмент защиты в оружие против компании.

Остро стоят этические и правовые вопросы. Использование ИИ связано с массовым сбором данных, что грозит скандалами из-за того, что нет чётких законов, определяющих, кто отвечает за ущерб от решений ИИ. 30 мая 2025 года вступили в силу новые штрафы за нарушения при работе с персональными данными. Базовые штрафы для организаций выросли с 60–100 тысяч до 150–300 тысяч рублей, за утечки данных - до 15 млн рублей.

Наконец, внедрение упирается в колоссальные затраты и нехватку специалистов. Помимо дорогих лицензий, до 80% бюджета съедает подготовка данных. На рынке же катастрофически не хватает команды «три в одном»: data-учёных, понимающих математику; экспертов-кризисников, ставящих задачи; и инженеров, которые всё это соберут.

Искусственный интеллект перестал быть футуристической концепцией и стал практическим, мощным инструментом антикризисного управления. Он осуществляет сдвиг от реактивного «тушения пожаров» к проактивному предотвращению «возгораний». ИИ выступает как стратегический актив, который не только защищает от потерь, но и создает основу для долгосрочной устойчивости и конкурентного преимущества в нестабильном мире.

Однако путь к «умному» антикризисному управлению не сводится к простой покупке программного обеспечения. Это комплексная трансформация, требующая инвестиций в данные, инфраструктуру, кадры и корпоративную культуру. Ключ к успеху лежит не в замене человека машиной, а в создании эффективного симбиоза, где человеческий опыт, стратегическое мышление и этическая ответственность усиливаются скоростью, масштабом и точностью аналитики искусственного интеллекта. Будущее за организациями, которые смогут грамотно интегрировать ИИ в свою систему управления рисками, превратив его из дорогой технологии в незаменимый стратегический инструмент.

Список литературы:

1. Кризис в прямом эфире: умные технологии меняют антикризисные коммуникации // РБК Компании. — URL: https://companies.rbc.ru/news/zmYH5ei6yH/krizis-v-pryamom-efire-umnyie-tehnologii-menyayut-antikrizisnyie-kommunikatsii/
2. «К2 НейроТех» назвал пять ИИ−трендов в финансах: от автоматизации к экосистемам и антикризисным решениям // CNews. — 2025. — 24 сентября. — URL: https://www.cnews.ru/news/line/2025-09-24_k2_nejroteh_nazval_pyat
3. Предиктивная аналитика политических кризисов с помощью machine learning // Habr. — URL: https://habr.com/ru/articles/852276/
4. Особенности антикризисного управления предприятием в условиях цифровизации // КиберЛенинка. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-antikrizisnogo-upravleniya-predpriyatiem-v-usloviyah-tsifrovizatsii
5. Искусственный интеллект и репутация: плюсы и риски в рекламе и маркетинге // Workspace. — URL: https://workspace.ru/blog/iskusstvennyy-intellekt-i-reputaciya-plyusy-i-riski-v-reklame-i-marketinge/
6. Искусственный интеллект в управлении цепями поставок и логистике / Дыбская, В. В., Сергеев, В. И. // Высшая школа экономики. — 2024. — URL: https://www.hse.ru/data/2025/10/24/147090950/8_Статья-доклад%20Дыбская-Сергеев_Конф.%20Красноярск_2024.pdf
7. Риски внедрения ИИ: когда лучше отказаться // Тинькофф Журнал. — URL: https://secrets.tbank.ru/blogi-kompanij/kogda-luchshe-ne-vnedryat-ii/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F#2
8. ИИ от Росатома помогает предотвращать аварии // Росэнергоатом. — URL: https://www.rusatom-utilities.ru/media-center/news/ii-ot-rosatoma-pomogaet-predotvrashchat-avarii/
9. Применение искусственного интеллекта в прогнозировании техногенных катастроф // Nauka.ru. — URL: https://naukaru.ru/ru/nauka/article/93068/view
10. Судебная практика по спорам, связанным с использованием ИИ в бизнесе // Право.ру. — URL: https://pravo.ru/story/259757/
11. ИИ−ассистенты нового поколения: обзор возможностей и ограничений // Habr. — URL: https://habr.com/ru/articles/959816/

РАЗРАБОТКА АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Шувалов Е.А.[1], Ясюк В.О.[2]

[1]Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

[2]ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Сегодня технологии искусственного интеллекта (ИИ) продолжают развиваться и находят все больше применений в различных сферах жизни общества. ИИ активно внедряется в различные системы автоматического управления (САУ), обеспечивая ряд преимуществ подобных систем: повышение автоматизации процессов обработки информации и высокая оперативность обработки информации, функционирование в условиях неполноты данных и неопределенности, возможность обучения для решения широкого спектра задач, возможность дообучения или переобучения непосредственно в процессе работы для повышения качества функционирования или быстрой адаптации систем к новым условиям [1].

Однако новшества, связанные с использованием ИИ в различных САУ, сопряжены с возникновением ряда новых рисков и угроз. К таким угрозам можно отнести, например, уязвимости безопасности в архитектуре и противоречия в функционировании ИИ [2,3].

Поэтому важным вопросом является не только разработка систем ИИ, но и обеспечение их информационной и функциональной безопасности [4,5].

Одним из перспективных направлений исследований в этой области является разработка САУ на основе импульсных нейронных сетей (НС) [3], так как за счет импульсного кодирования информации они обеспечивают не только безопасность САУ от перехвата управления, но и высокую энергоэффективность, что важно в устройствах граничных вычислений, обеспечивающих управление автономными роботизированными системами непосредственно на их борту.

Нами была разработана модель и реализован макет электрической импульсной НС, состоящей из пяти осцилляторов, являющихся аппаратными имитаторами нейронов [6,7,8]. Элементами НС являются нейроны, которые обмениваются между собой короткими аналоговыми импульсами. Таким образом информация кодируется и запоминается в элементах сети посредством совокупности связей между ними.

В разные моменты времени нейроны в сети могут находиться в различных состояниях, которые определяются значениями периода и фазы колебаний для совокупности нейронов [6,7,8]. Импульсная нейросеть может демонстрировать большое количество режимов колебаний [9,10]. К таким режимам относятся регулярные режимы колебаний (каждый нейрон совершает одно колебание в течение периода колебаний нейросети $T_{рел}$).

Регулярные режимы колебаний для системы из пяти нейронов: «1+1+1+1+1» - пятикластерный; «2+1+1+1» - четырехкластерный; «2+2+1», «3+1+1» - трехкластерные; «3+2», «4+1» - двухкластерные; «5» - однокластерный. Диаграммы данных режимов приведены на рисунке 1.

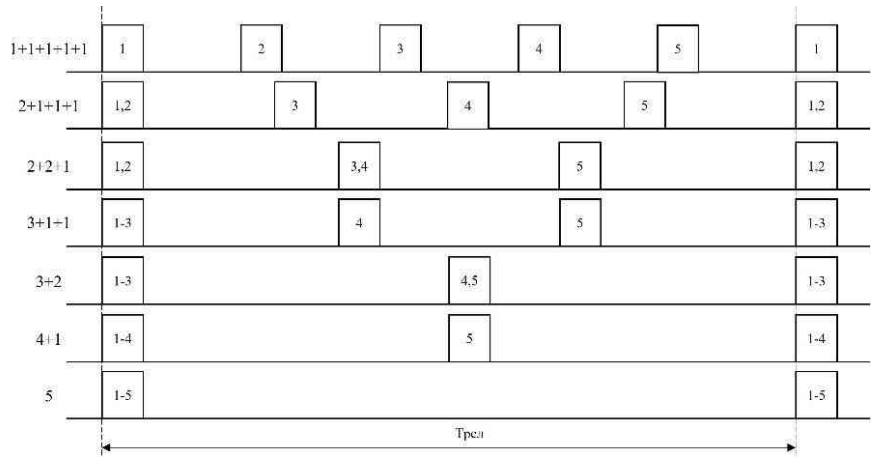


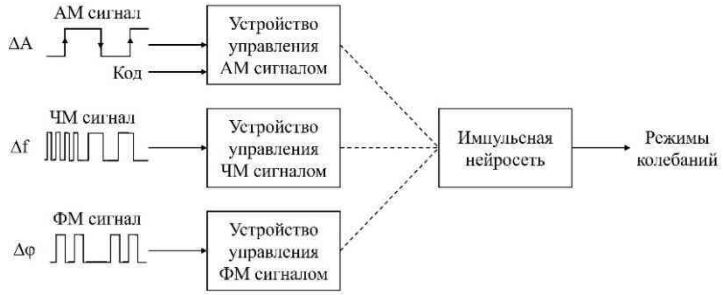
Рисунок 1 – Регулярные режимы колебаний системы из пяти нейронов

На основании полученных ранее результатов функционирования импульсной НС [6,7,8,10], нами были разработаны модели аналоговых электрических устройств для управления НС из пяти нейронов. Каждое из этих устройств позволяет автоматически переключать систему нейронов в тот или иной регулярный режим колебаний при помощи одного или нескольких управляющих сигналов. Однако всегда имеется один главный управляющий сигнал, параметры которого определяют состояние НС.

В качестве задаваемых параметров могут быть использованы амплитуда, частота (скважность) и фаза управляющего дискретного сигнала. То есть для управления системой нейронов могут быть использованы три вида модуляции сигналов: амплитудная, частотная и фазовая [11]. Соответственно нами были разработаны модели трех электрических устройств, которые схематично представлены на рисунке 2.

Устройство управления импульсной НС при помощи АМ сигнала реализует переключение НС из одного режима колебаний в другой при скачкообразном изменении амплитуды управляющего сигнала. При скачке амплитуды в максимальное значение НС переключается в один режим, при скачке амплитуды в минимальное значение – в другой режим. Данный подход позволяет переключаться только между двумя режимами колебаний, в то время как для системы из пяти нейронов существует семь возможных регулярных режимов. Для возможности выбора любой пары режимов используются дополнительные дискретные сигналы. Эти сигналы кодируют режимы колебаний таким образом, что один код отвечает за

выбор режима колебаний при спаде управляющего сигнала, а второй код – за выбор режима колебаний при фронте управляющего сигнала. Таким образом каждому режиму колебаний присваивается свой собственный код. Причем порядок кодирования может быть реализован произвольно.



Сигналы: АМ – амплитудная модуляция, ЧМ – частотная модуляция, ФМ – фазовая модуляция.

Рисунок 2 – Схемы аналоговых систем преобразования информации

Устройство управления импульсной НС при помощи ЧМ сигнала позволяет переключать НС в любой регулярный режим колебаний при помощи изменения частоты (скважности) управляющего сигнала. В данном способе управления каждый режим колебаний кодируется своей собственной частотой. Значения частот определяются схемотехническим построением системы и могут быть подобраны произвольно. Данное устройство требует четких расчетных значений частоты управляющего сигнала, не допуская больших отклонений или промежуточных значений. При несоблюдении данного условия нейроны в НС могут образовывать непредусмотренные режимы колебаний. Между переключением НС из одного режима в другой существует незначительное время задержки, в течение которого могут образовываться непредусмотренные режимы колебаний.

Устройство управления импульсной НС при помощи ФМ сигнала реализует переключение НС в один из возможных регулярных режимов колебаний в зависимости от значения величины фазового сдвига управляющего сигнала. Величина фазового сдвига управляющего сигнала определяется относительно опорного сигнала, как регулируемый временной интервал между импульсами опорного и импульсами управляющего сигналов.

Каждому режиму колебаний ставится в соответствие определенное значение величины фазового сдвига. При этом величина фазового сдвига не может превышать период колебаний. Период колебаний можно условно разделить на число секторов, равное числу регулярных режимов колебаний. Каждый сектор имеет собственный код, кодирующий величину фазового сдвига, причем соответствие секторов и режимов колебаний может быть задано произвольно. Система фиксирует сектор, в котором расположен импульс управляющего сигнала, образуя соответствующий режим колебаний НС. Данное управляющее устройство требует четкого переключения фазового сдвига между расчетными значениями, поскольку временные интервалы отслеживаемых секторов достаточно малы. Поэтому даже незначительной погрешности значения фазового сдвига будет достаточно, чтобы переключить НС не в тот режим колебаний.

Результаты функционирования данных устройств были получены при помощи построения их моделей в среде NI Multisim [12]. На рисунке 3 представлены осциллограммы управляющих сигналов, при которых образуется режим колебаний «1+1+1+1+1», а также осциллограммы самого режима колебаний.

Таким образом, представленные системы могут быть использованы для управления более крупными электрическими импульсными НС, содержащими большее число нейронов. При помощи данных систем также могут быть реализованы многослойные импульсные НС, поскольку в качестве управляющих сигналов могут использоваться сигналы других нейронов.

В свою очередь управляющими сигналами могут служить непосредственно сигналы, снятые с датчиков или со считывающей аппаратуры. В таком случае модели представленных устройств являются неким аналогом систем восприятия [13]. Эти системы могут быть использованы для реализации САУ с защищенными каналами передачи информации [1-5].

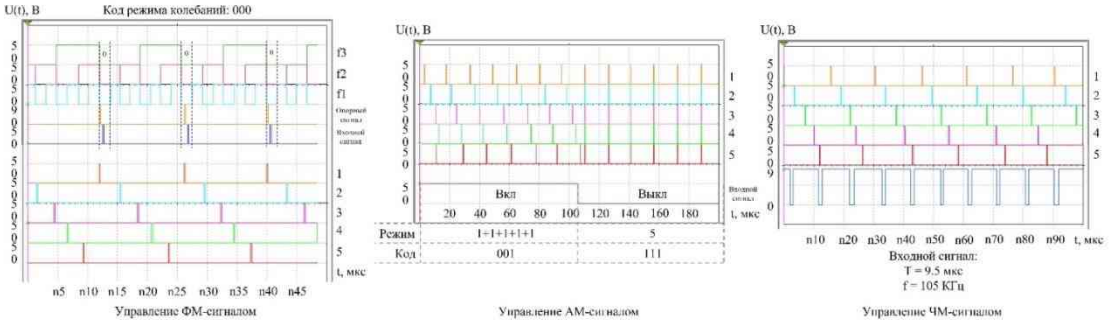


Рисунок 3 – Осциллограммы функционирования моделей систем преобразования

Список литературы:

1. Немченко И.А., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Динамически адаптированная модель управления комплексными системами // Информационная безопасность и защита информации: сборник статей / Сост. А.И. Астайкин, А.П. Мартынов, Д.Б. Николаев, В.Н. Фомченко / В 2 Т. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 498 с., ил.

2. Анисимов Ю.А., Грибунин В.Г., Кондаков С.Е., Мартынов А.П., Николаев Д.Б. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков, А.П. Мартынов, Д.Б. Николаев. – Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2025. – 191 с., ил.

3. Ясюк В.О., Шувалов Е.А. Искусственный интеллект в сложных технических системах специального назначения // Материалы XXVI Харитоновских тематических научных чтений "Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах" (Саров, 2025). Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2025. С. 186

4. Бабанов Н.Ю., Евстифеев А.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Основы защиты информации в современных информационных системах: учебное пособие. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. - 175 с.

5. Букин А.Г., Волков К.О., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Смуров С.В. Теоретические основы и области применения физически не клонируемых функций. - Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2022. - 288 с.

6. Шувалов Е.А., Ясюк В.О. Модель электрической схемы импульсной нейронной сети из трех осцилляторов, реализующей регулярные режимы колебаний // Материалы XXVI Харитоновских тематических научных чтений "Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах" (Саров, 2025). Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2025. С. 178

7. Шувалов Е.А., Ясюк В.О. Модель защищенной колебательной системы, генерирующей дискретные импульсы с регулируемым фазовым сдвигом // Сборник материалов XIX Всероссийской молодежной научно-инновационной школы "Математика и математическое моделирование" 9-11 апреля 2025 г. Саров: СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2025. Том 1. С. 72-73

8. Шувалов Е.А., Ясюк В.О. Аналоговая криптосистема на основе электрической импульсной нейросети // Направления совершенствования искусственного интеллекта и вопросы его взаимодействия с человеком в образовательных системах. Москва, ООО "Издательский Центр РИОР", 2025, изд. 1, 368 стр.

9. Vanag V.K. and Yasuk V.O. Dynamic modes in a network of five oscillators with inhibitory all-to-all pulse coupling // Chaos 28, 2018. P. 033105.

10. Шувалов Е.А., Ясюк В.О. Система распознавания режимов колебаний импульсных нейросетей // Сборник тезисов докладов XXIII научно-технической конференции "Молодежь в науке" (28-30 октября 2025 г.) - Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2025. С. 153

11. Астайкин А.И., Помазков А.П. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебное пособие. В 2 томах. Том 1. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010, 344 с.

12. Шестеркин А.Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10: практическое руководство. 2-е изд. – М.: «ДМК Пресс», 2023. – 361 с.

13. Pawlak W.A. and Howard N. (2025) Neuromorphic algorithms for brain implants: a review. Front. Neurosci. 19:1570104.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОСЛОЙНОГО ВИРТУАЛЬНОГО АДАПТАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

Дюпин В.Н.
Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Виртуальная реальность – компьютерная модель окружающего мира, в которую погружается субъект виртуальной реальности по средству специальных технических интерфейсов [1]. Кроме технических интерфейсов виртуальная реальность опирается на программную среду, которая моделирует процессы взаимодействия объектов виртуальной реальности [2].

Существуют гибридные системы, которые позволяют создать упрощенные системы виртуальной реальности. Примером таких систем являются системы дополненной реальности. Системы дополненной реальности опираются на каналы восприятия человека и технические средства, которые проецируют компьютерные модели на каналы восприятия человека. Таким образом, системы дополненной реальности синтезируют естественные интерфейсы восприятия окружающего мира и технические интерфейсы виртуальных моделей, позволяя создать программные оболочки виртуальной реальности.

Системы виртуальных адаптационных пространств являются особым классом систем виртуальной реальности, которые позволяют сбалансировать нагрузку на активные каналы восприятия человека. Виртуальные адаптационные пространства применяются для создания подсистем виртуальной реальности, погружаясь в которые субъект виртуальной реальности с поврежденными каналами восприятия может взаимодействовать с окружающим миром [3].

Модель виртуального адаптационного пространства

Концептуальная модель виртуального адаптационного пространства имеет многослойную архитектуру (Рис. 1).

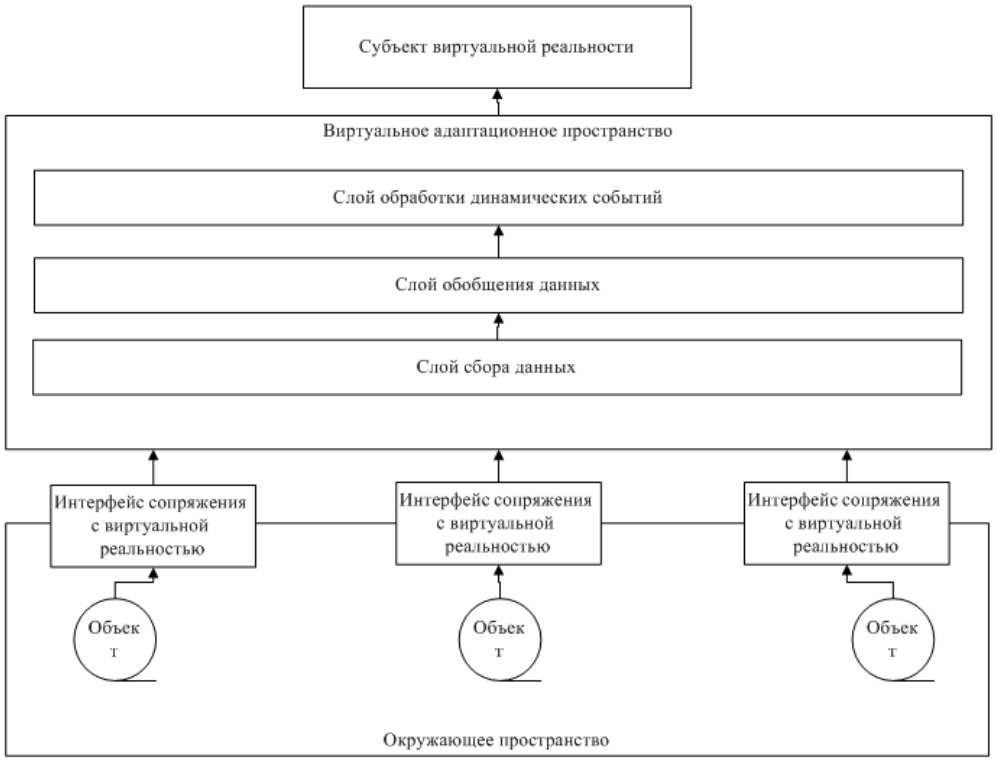


Рисунок 1 – Структура виртуального адаптационного пространства

На нижнем слое виртуального пространства располагаются интерфейсы, которые собирают информацию об объектах окружающего мира и проецируют эту информацию на датчики субъекта виртуальной реальности.

На втором слое происходит обобщение собранной информации с выделением характерных черт объектов окружающего пространства.

Оперируя обобщенными данными виртуальное адаптационное пространство создает математические модели с простой геометрией объектов. Объекты наделяются пространственно временными характеристиками для последующего моделирования сценариев взаимодействия объектов слоем обработки динамических событий.

Виртуальное адаптационное пространство проецирует объекты виртуальной реальности на каналы восприятия субъекта виртуальной реальности. Например, на кожу субъекта виртуальной реальности наносится металлизированный слой краски на под поверхность кожи. Намагниченный слой адаптеров виртуальной реальности притягивает фрагменты кожи субъекта, создавая эффект осязания объектов виртуального пространства.

Представленная концептуальная модель описывает базовое представление процесса построения систем виртуальных адаптационных пространств. Модель виртуального адаптационного пространства позволяет обобщить данных об объектах окружающего пространства и спроецировать их на каналы восприятия субъекта виртуального адаптационного пространства. Применение систем виртуальных адаптационных пространств позволит создать комплексные системы навигации людей в окружающем пространстве в условиях снижения качества восприятия части сигналов с каналов восприятия.

Список литературы:

1. Бабанов Н.Ю., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н., Новиков А.В. Виртуальная интерактивная система формирования и отработки управляющей информации. Вестник НГИЭИ. 2016. № 4 (59). С. 15-29.
2. Васильев Р.А., Николаев Д.Б. Анализ возможностей применения голосовой идентификации в системах разграничения доступа к информации. Научный результат. Информационные технологии. 2016. Т. 1. № 1. С. 48-57.
3. Дюпин В.Н. Реализация защищенного протокола передачи данных в виртуальном адаптационном пространстве // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 7. – С. 237-240.

МНОГОФАКТОРНАЯ ЗАЩИТА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ ОТ АТАК ПОДМЕНЫ ЛИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ 3D-ГЕОМЕТРИИ ЛИЦА

Сарлейский А.В., Копейкин А.Э., Михеева К.Н., Клокова В.К., Суров А.Н.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Современное общество переживает этап стремительной цифровизации критически важных инфраструктур. Системы контроля и управления доступом (СКУД) на основе лицевой биометрии стали стандартным инструментом в банковском секторе, на режимных объектах и в персональных мобильных устройствах. Однако параллельно с прогрессом методов распознавания лиц наблюдается экспоненциальный рост сложности инструментов для обхода этих систем. Проблема атак имитации личности (spoofing) перешла из теоретической плоскости в область повседневных угроз.

Основная уязвимость классических систем распознавания заключается в использовании плоских (2D) изображений. RGB-камера фиксирует проекцию трехмерного объекта на плоскость сенсора, что неизбежно ведет к потере пространственной информации. Злоумышленники используют этот фундаментальный недостаток, применяя «атаки предъявления» (Presentation Attacks): от простых распечатанных фотографий и воспроизведения видео на экранах высокого разрешения до создания сложнейших 3D-печатных масок, имитирующих не только форму, но и текстуру человеческого лица. Существующие методы программного анти-спуфинга (анализ моргания, микро-движений или текстурных шумов) зачастую оказываются неэффективными против динамических дипфейков или физически точных масок [1].

В связи с этим критическую актуальность приобретает переход к полноценной трехмерной биометрии. Анализ геометрии лица в пространстве *(x,y,z)* позволяет учитывать уникальные антропометрические характеристики, такие как глубина посадки глазных яблок, точная кривизна переносицы, объем скуловых костей и микрорельеф кожи. Эти параметры крайне сложно воспроизвести одновременно и с высокой точностью. Однако работа с 3D-данными в реальном времени предъявляет высокие требования к методам захвата, обработки и классификации. Целью данного доклада является теоретическое обоснование и описание

архитектуры устойчивой системы, объединяющей последние достижения в области нейронных полей, статистического моделирования и глубокого обучения на облаках точек.

Аппаратные методы захвата и роль статистического моделирования 3DMM

Обеспечение устойчивости системы начинается на физическом уровне захвата данных. В отличие от пассивного наблюдения, современная защищенная СКУД должна использовать методы активного зондирования. Технология LiDAR (Light Detection and Ranging), основанная на принципе Time-of-Flight (ToF), позволяет генерировать облако точек объекта независимо от условий внешнего освещения. Измеряя время возврата лазерного импульса от каждой точки лица, система получает мгновенный и точный «цифровой слепок» объема. Любая попытка подмены лица плоским носителем (фотографией или экраном) немедленно фиксируется, так как LiDAR определит отсутствие перепадов глубины, что является первым и наиболее надежным фильтром анти-спуфинга.

Для регистрации доверенных пользователей в базе данных целесообразно использовать методы фотограмметрии [2]. Этот подход заключается в анализе серии перекрывающихся 2D-изображений высокого разрешения, полученных под разными ракурсами. Путем триангуляции и сопоставления общих признаков строится плотная полигональная сетка (mesh). Фотограмметрия позволяет создать высокоточный эталон, содержащий не только геометрию, но и детализированную текстуру, что критично для последующего сравнения в процессе верификации.

Однако сырые данные с сенсоров часто подвержены шумам и искажениям. Для их интерпретации необходимо использование 3D Morphable Models (3DMM). 3DMM — это математический фреймворк, основанный на анализе главных компонент (PCA) тысяч предварительно отсканированных человеческих лиц [3]. Данная модель разделяет биометрическую информацию на две составляющие: форму (shape) и экспрессию (expression). Использование 3DMM в устойчивой СКУД решает две важнейшие задачи. Во-первых, модель позволяет «достроить» недостающие части лица, если пользователь повернут к камере не полностью. Во-вторых, 3DMM выступает в роли анатомического цензора: если предъявленный объект имеет параметры, выходящие за границы статистического распределения человеческих лиц (например, если маска слишком массивная или искажает пропорции), система классифицирует это как атаку имитации. Таким образом, комбинация LiDAR и 3DMM обеспечивает надежный фундамент, отсекая примитивные и среднеуровневые попытки взлома на этапе пре-процессинга.

Интеллектуальный анализ геометрии с помощью MediaPipe и PointNet

После получения и первичной фильтрации 3D-данных необходимо провести их идентификацию и глубокую проверку. В условиях реального времени (например, на проходной или при разблокировке устройства) решающее значение имеет скорость локализации объекта. Для этих целей эффективно применение инструментов MediaPipe от Google, в частности Face Mesh [4]. MediaPipe оперирует набором из 468 ключевых точек, позволяя в миллисекундном диапазоне определить положение лица, его ориентацию (наклон, поворот) и мимическую активность. Хотя MediaPipe сам по себе не обеспечивает достаточной глубины анализа для защиты от профессиональных масок, он служит «навигатором» для более тяжелых алгоритмов, выполняя нормализацию (alignment) облака точек и выделяя релевантную зону интереса (Region of Interest, ROI).

Для основной задачи распознавания и защиты от спуфинга в докладе рассматривается архитектура PointNet [5]. Это первая нейронная сеть, предназначенная для прямой обработки неструктурированных облаков точек без необходимости их предварительной вокселизации или превращения в набор 2D-снимков. PointNet решает фундаментальную проблему: облако точек — это просто неупорядоченный список координат. Сеть использует симметричные функции (такие как max pooling), чтобы гарантировать инвариантность к порядку точек.

В архитектуру PointNet интегрированы так называемые T-Net модули — небольшие подсети, которые обучаются применять аффинные преобразования к входным данным, обеспечивая устойчивость к вращению и масштабированию объекта. В нашей системе PointNet выполняет роль глубокого классификатора. Она обучается на огромных массивах данных, содержащих как реальные 3D-сканы лиц, так и сканы различных артефактов атак (маски, бюсты, манекены). Благодаря способности извлекать глобальные признаки формы, PointNet эффективно идентифицирует личность даже при изменении прически, наличии очков или бороды, ориентируясь на неизменные костные структуры лица, зафиксированные в 3D.

Объемный рендеринг и анализ текстур: NeRF И 3D Gaussian Splatting

Наиболее изощренным типом атаки является использование высококачественных силиконовых масок, которые практически идентичны человеческому лицу по геометрии и визуальному восприятию. Для борьбы с такими угрозами необходимо анализировать не только форму, но и то, как поверхность взаимодействует со светом. Традиционные методы здесь бессильны, поэтому предлагается использование технологий нейронного синтеза изображений.

Технология NeRF (Neural Radiance Fields) позволяет представить объект как непрерывное объемное поле сияния. При обучении NeRF на коротком видеопотоке пользователя система выстраивает функцию, которая описывает плотность и цвет каждой точки в пространстве [6]. Это позволяет системе генерировать изображения лица с любого ракурса с фотографической точностью. Ключевым фактором для безопасности здесь является «подповерхностное рассеивание» (subsurface scattering) — физический эффект, при котором свет проникает внутрь кожи и рассеивается перед выходом наружу. Кожа человека обладает уникальными характеристиками рассеивания, которые кардинально отличаются от свойств латекса, силикона или пластика. Анализ объемных полей NeRF позволяет выявить эти микроскопические различия, выступая мощнейшим методом liveness-детекции.

Однако NeRF требует значительных временных затрат на обучение и рендеринг, что затрудняет его использование в потоковых СКУД. Революционным развитием этой идеи стала технология 3D Gaussian Splatting (3DGS). В отличие от NeRF, 3DGS представляет сцену не через нейронную сеть, а через миллионы оптимизированных трехмерных гауссиан (эллипсоидов с параметрами прозрачности и цвета) [7].

Преимущества 3DGS для биометрической устойчивости неоспоримы:

- Скорость: Обучение модели и рендеринг происходят в десятки раз быстрее, чем в NeRF, достигая частоты кадров более 100 FPS.
- Детализация: 3DGS позволяет сохранять и анализировать микротекстуру кожи (поры, мелкие морщины), которые практически невозможно воспроизвести на маске без потери естественности.
- Дифференцируемый рендеринг: Система может мгновенно сопоставить текущий видеопоток с синтезированной моделью, выявляя любые несоответствия в отражающей способности поверхности.

Использование 3DGS позволяет системе за 1-2 секунды наблюдения за пользователем построить его полную цифровую копию и подтвердить, что перед камерой находится биологический объект, а не искусная имитация.

Синергия технологий и алгоритм функционирования системы

Устойчивость предлагаемой системы контроля доступа обеспечивается за счет многослойного прохождения данных через описанные технологические модули. Процесс верификации можно представить как последовательность этапов:

- Сенсорный захват и первичный анти-спуфинг: LiDAR сканирует объект. Если обнаруживается плоскость или экран, доступ блокируется. Параллельно RGB-камера фиксирует изображение.
- Пространственная ориентация: MediaPipe Face Mesh находит лицо и строит опорную сетку из 468 точек. На этом этапе проверяется наличие базовых мимических признаков.
- Анатомическая фильтрация: Облако точек сопоставляется с 3DMM. Модель проверяет соответствие пропорций антропометрическим нормам, отсекая крупные накладки и маски, искажающие скелет лица.
- Геометрическая идентификация: Очищенное и нормализованное облако точек подается на вход PointNet. Сеть сравнивает биометрический дескриптор лица с эталоном в базе данных.
- Текстурно-объемная верификация (Liveness): В фоновом режиме модуль 3DGS строит объемную модель текущей сессии. Проводится анализ микрорельефа и световых бликов на поверхности. Если характеристики материала не совпадают с параметрами кожи, доступ запрещается даже при совпадении геометрии.

Такая архитектура делает атаку имитации личности экономически и технически нецелесообразной, так как требует от злоумышленника одновременного воспроизведения сложнейшей геометрии, динамики движений и физико-оптических свойств живой ткани.

Обеспечение устойчивости биометрических систем — это непрерывная гонка вооружений между разработчиками и злоумышленниками. Переход от 2D к 3D биометрии, подкрепленный мощью таких алгоритмов, как PointNet и 3D Gaussian Splatting, открывает

новую эру в информационной безопасности. Интеграция LiDAR для получения глубины, 3DMM для анатомической точности и нейронных полей для анализа текстур позволяет создать СКУД, способную противостоять самым совершенным методам имитации личности.

Внедрение данных технологий на критически важных объектах позволит минимизировать риски несанкционированного доступа, обеспечивая при этом высокую скорость и удобство для легитимных пользователей. Дальнейшие исследования в этой области будут сосредоточены на оптимизации 3DGS для мобильных платформ и повышении устойчивости PointNet к экстремальным условиям захвата данных, что сделает трехмерную биометрию мировым стандартом безопасности.

Список литературы:

1. Handbook of Biometric Anti-Spoofing: Trustworthy Biometric Recognition / edited by S. Marcel, M.S. Nixon, J. Fierrez, N. Evans. – 3rd ed. – Cham : Springer Nature, 2023. – 541 p.
2. Методы и средства трехмерного сканирования и моделирования : учебное пособие / А.В. Конушин, А.С. Крылов. – Москва : Изд-во МГУ, 2015. – 128 с.
3. Egger, B. 3D Morphable Face Models — Past, Present, and Future / B. Egger, W.A.P. Smith, A. Tewari [et al.] // ACM Transactions on Graphics. – 2020. – Vol. 39. – № 5. – P. 1–38.
4. MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines / C. Lugaresi, J. Tang, H. Nash [et al.] // arXiv preprint arXiv:1906.08172. – 2019. – 8 p.
5. Qi, C.R. PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation / C.R. Qi, H. Su, K. Mo, L.J. Guibas // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 652–660.
6. Mildenhall, B. NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis / B. Mildenhall, P.P. Srinivasan, M. Tancik [et al.] // Communications of the ACM. – 2021. – Vol. 65. – № 1. – P. 99–106.
7. Kerbl, B. 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Render-ing / B. Kerbl, G. Kopanas, T. Leimkühler, G. Drettakis // ACM Transactions on Graphics. – 2023. – Vol. 42. – № 4. – P. 1–14.

ПОДХОД ПО СОЗДАНИЮ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ

Синькова К.В. Дюпин В.Н.
Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Современные информационные системы играют ключевую роль во всех отраслях народного хозяйства. Информационные системы позволяют автоматизировать технические процессы производства в сферах крупного и малого бизнеса [1].

Ключевыми компонентами информационных систем являются процессы сбора, обработки, хранения информации.

Задача автоматизации управления процессами информационных систем реализуется ядром информационной системы. Традиционно ядром информационной системы являются системы управления базами данных [2].

Системы управления базами данных предоставляют инструменты для хранения данных объектов информационной системы в табличном представлении и набор средств для управления состоянием объектов [3].

При реализации открытых информационных систем в качестве системы хранения данных используется единая база данных. При использовании ресурсов внешних информационных систем прямой доступ к системе хранения данных внешних систем может отсутствовать. Для решения задачи организации коммуникации между разнородными информационными системами создаются программные средства управления распределенной информационной системой.

Программные средства управления распределенной информационной системой

На рисунке 1 представлен пример распределенной системы.

Распределенная информационная система приведенного примера включает три программных компонента.

Программный компонент 1 и программный компонент 2 осуществляют передачу данных через общую файловую систему и через каналы передачи данных, интерфейсы которых реализуются программным средством управления данными.

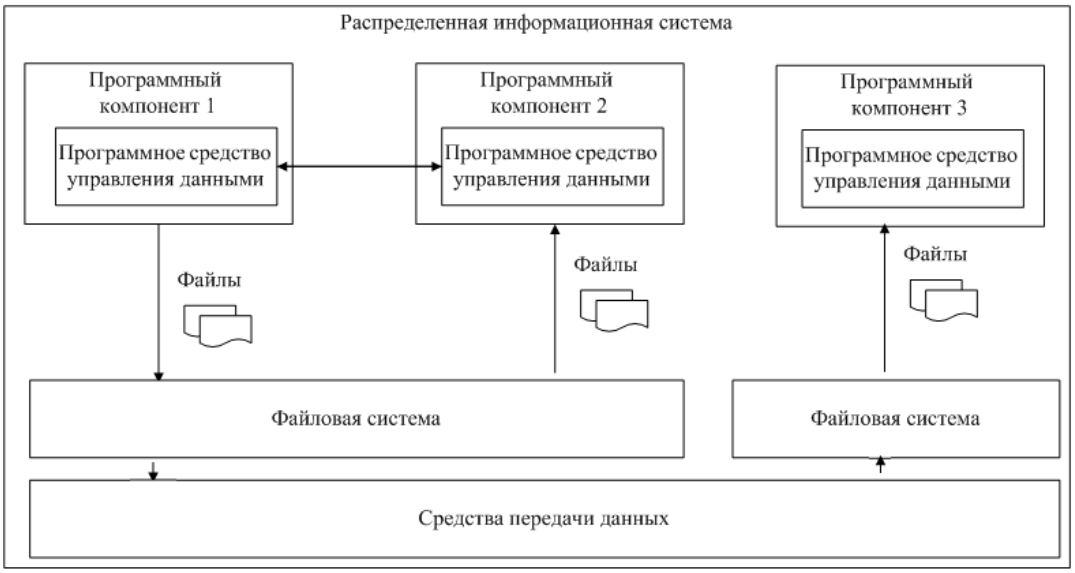


Рисунок 1 – Пример распределенной информационной системы

В качестве интерфейса передачи данных программного средства управления данными могут использоваться сетевые сокеты (где сокет – программный интерфейс для обмена данными между процессами, которые могут работать как на одном вычислительном сегменте, так и на разных вычислительных сегментах сети) TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) [4].

При передаче больших объемов данных программные средства управления распределенной информационной системой используют ресурсы файловой системы. Сами данные передаются в виде файлов информационной системы, формат которых определяется программным компонентом информационной системы.

В общем случае программные средства управления распределенной информационной системой могут не знать структуру хранения данных в файлах файловой системы.

Программные средства управления распределенной информационной системой создают сценарии для передачи данных программным компонентам и реализуют планировщики заданий для запуска программных компонентов, которые обрабатывают файлы.

Распределенные информационные системы могут охватывать различные сегменты вычислительной сети, которые могут находиться под управлением различных операционных систем.

При передаче данных в рамках операционной системы Windows может использоваться стандартный протокол файловой системы FTP (File Transfer Protocol).

При передаче данных между программными компонентами, расположенными в различных операционных системах может быть использован протокол SFTP (Secure File Transfer Protocol). SFTP – защищенный протокол прикладного уровня передачи файлов, который работает поверх безопасного канала.

Представленный подход по созданию программных средств управления информационной системой предоставляет набор функционала для гибкого управления ресурсами распределенной информационной системы. Учитывая, что ресурсы информационной системы могут располагаться в различных операционных системах, к таким объектам информационной системы могут применяться различные требования по хранению данных. Следовательно, программные средства управления ресурсами информационной системы должны использовать ресурсы и правила операционных систем, в которых расположены эти ресурсы. Данное поведение достигается путем использования средств планирования задач и инструментами для запуска задач на распределенных ресурсах информационной системы. Программные средства управления распределенной информационной системой предоставляют удобный единообразный интерфейс для обмена данными между разнородными программными компонентами информационной системы.

Список литературы:
1. Зверева В.П. Сопровождение и обслуживание программного обеспечения компьютерных систем: учебник для среднего профессионального образования по специальности «Информационные системы и программирование». – Москва: Академия, 2018. – 255 с.
2. Дюпин В.Н. Подход к построению подсистемы защиты информации в виртуальном адаптационном пространстве // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 6. – С. 340-343.
3. Дюпин В.Н. Реализация защищенного протокола передачи данных в виртуальном адаптационном пространстве // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 7. – С. 237-240.
4. Олифер Виктор, Олифер Наталья Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Юбилейное издание. – СПб.: Питер, 2021. – 1008 с.

УСТАНОВКА, НАСТРОЙКА, АДМИНИСТРИРОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКТАМИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ SECRET NET STUDIO

Яковлев Н.С., Романова М.Д.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

На практике СЗИ Secret Net Studio [1] используют совместно с программно-аппаратным комплексом (ПАК) Соболь, представляющим из себя «электронный замок», который защищает компьютеры и серверы от несанкционированного доступа, и антивирусом Kaspersky, предназначенным для защиты компьютеров и серверов от вредоносных программ. Размещенное ПО на компьютере позволяют свести к минимуму угрозу несанкционированного доступа и открытия нежелательных программ. Приведенные выше ПО и ПАК отображают на сервере SNS и Kaspersky все нежелательные действия пользователей, будь это монтирование неизвестного устройства, например, USB накопителя (это действие можно предостеречь посредством соответствующих настроек Secret Net Studio на компьютере пользователя); изменение конфигурации компьютера, например, добавление нового жесткого диска или демонтаж комплектующих ПК (угрозу можно минимизировать с использованием ПАК Соболь соответствующей версии. Все изменения аппаратной конфигурации регистрируются на сервере SNS); и запуск нежелательных приложений на компьютере (угрозу запуска можно минимизировать посредством антивируса Kaspersky). Все вышеперечисленное – это лишь малая часть того, что на практике могут обеспечить данные средства защиты.

Secret Net Studio

Возможности Secret Net Studio:

1. Управление доступом к информации

Контроль прав доступа: система позволяет задавать и управлять правами пользователей и групп пользователей, обеспечивая доступ только к тем ресурсам и данным, к которым у них есть разрешение. Многоуровневая аутентификация: поддержка различных методов подтверждения личности (пароли, двухфакторная аутентификация). Разграничение доступа по уровням секретности: возможность маркировать и классифицировать информацию по уровням секретности (например, «Секретно», «Совершенно секретно»), а также управлять доступом к секретным сведениям в соответствии с этим разделением.

2. Мониторинг и аудит событий

Журналирование действий: автоматическая регистрация всех событий и действий пользователей — входов, попыток доступа, изменений настроек, передачи данных. Аналитика и отчётность: формирование отчётов о событиях безопасности, анализ подозрительных действий и инцидентов, выявление потенциальных угроз. Реагирование на инциденты: автоматические уведомления и запуск процедур реагирования при появлении подозрительных или несанкционированных действий.

3. Обеспечение секретности информации

Классификация информации: система позволяет устанавливать уровни секретности и маркировать документы и файлы в соответствии с требованиями нормативных документов. Автоматическая маркировка и шифрование: при необходимости система может автоматически применять шифрование к секретным данным, обеспечивая защиту в условиях передачи и

хранения. Контроль передачи данных: мониторинг и ограничение возможности передачи секретной информации через внешние носители, сеть или иные каналы.

4. Централизованное администрирование

Гибкая настройка политик безопасности: создание и внедрение правил, процедур и политик по обеспечению безопасности, которые автоматически применяются к пользователям и ресурсам. Управление ролями и группами: формирование ролей с определёнными правами доступа и групп пользователей для удобства управления крупными организациями. Интеграция с существующими системами: возможность подключения к внутренним корпоративным системам, системам Active Directory, LDAP и другим источникам данных.

5. Обеспечение соответствия нормативам

Соответствие стандартам: система реализует требования государственных стандартов и международных стандартов ISO/IEC 27001, что облегчает прохождение аудитов. Управление документацией и процедурами: автоматизация формирования документации по безопасности, регламентов и процедур, необходимых для соответствия требованиям законодательства.

6. Автоматизация процессов

Работа по сценариям: настройка автоматизированных сценариев реагирования на угрозы и инциденты, что повышает скорость и качество реакции. Обучение и поддержку пользователей: встроенные инструменты для обучения сотрудников и поддержки администраторов системы.

7. Защита и управление рабочими станциями и серверами

Контроль за использованием устройств: мониторинг работы устройств, контроль за установкой программного обеспечения, контроль подключения внешних носителей. Обеспечение безопасности операционных систем: интеграция с антивирусами, системами обнаружения вторжений и другими средствами защиты.

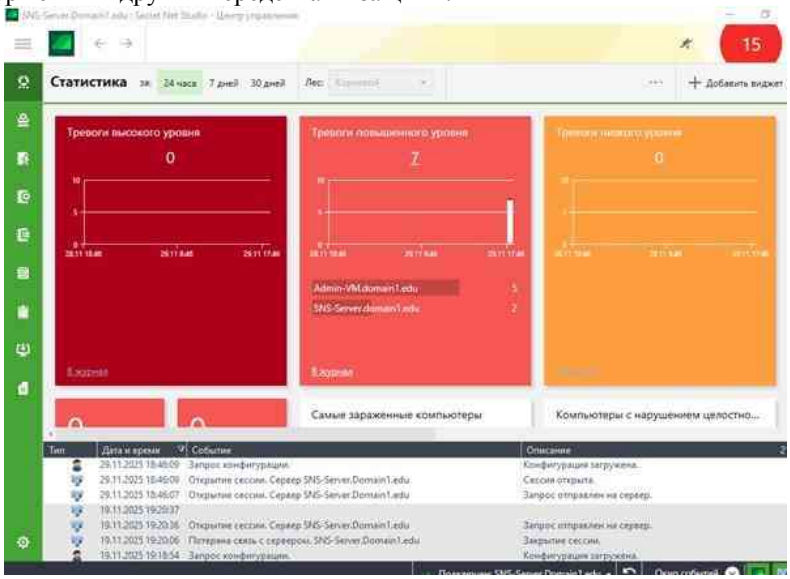


Рисунок 1 – Интерфейс программы Secret Net Studio

Для выполнения сценариев создан специальный тестовый стенд на платформе Oracle VM VirtualBox v7. Стенд построен на локальной сети 192.168.254.X/24, объединяющей 4 виртуальные машины:

Контроллер домена (DC)

Сервер Secret Net Studio (SNS_Server)

Клиент Secret Net Studio (SNS_Client)

Машина администратора (Admin_VM)

Локальная машина (Local VM) не входит в данную сеть и является автономной виртуальной машиной.

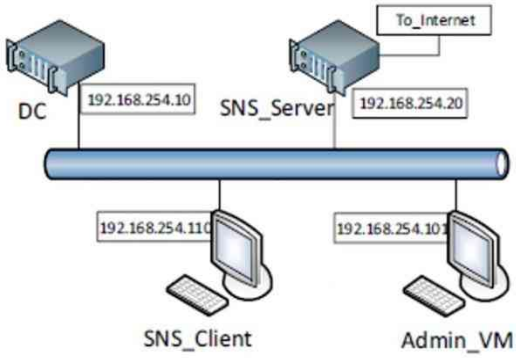


Рисунок 2 – Схема сети

Для корректной работы программы Secret Net Studio необходимо выполнить несколько операций до начала работы со стендом [2]. На ВМ **DC** в Active Directory создано организационное подразделение «**ou_sns**», на базе которого будет сформирован домен безопасности Secret Net Studio.В составе этого подразделения необходимо создать группу пользователей «**sns_forest**» - группу администраторов леса доменов безопасности и «**sns_group**» - группу администраторов домена безопасности. В группы безопасности «**sns_forest**» и «**sns_group**» добавлен пользователь **snsadmin**. В подразделение «**ou_sns**» добавлены компьютеры, которые будут входить в домен безопасности Secret Net Studio: **SNS-Server**, **SNS-Client**, **Admin_VM**. На компьютере Сервера безопасности SNS-Server включена доменная группа «sns_group» в группу локальных администраторов данного сервера. Выполнены все необходимые подготовительные работы.

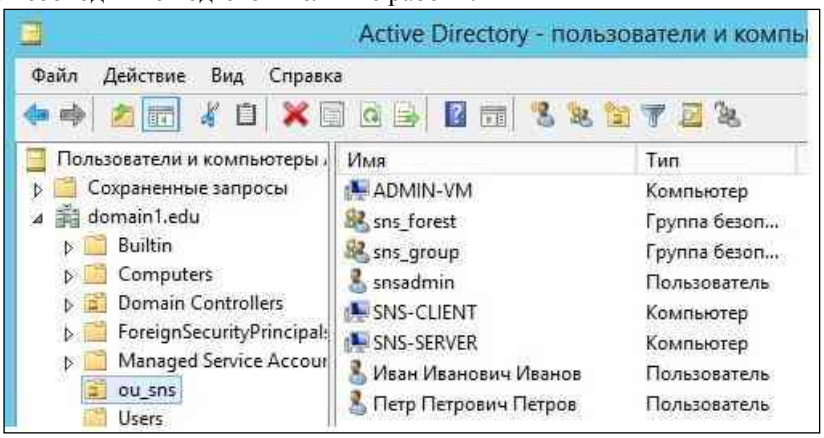


Рисунок 3 – Структура компьютеров и пользователей на ВМ DC

Централизованная установка SNS с формированием одного домена безопасности на базе организационного подразделения AD разделена на следующие этапы:

– Установка Сервера безопасности;

– Установка программы "Центр управления" (Центр управления, ЦУ);

– Установка на защищаемые компьютеры клиента Secret Net Studio.

При необходимости установки СЗИ Secret Net Studio на компьютеры пользователей, введенных в домен, необходимо в панели навигации с левой стороны окна SNS выбрать кнопку «Развертывание». Далее следует добавить в репозиторий дистрибутив Secret Net Studio. Этот образ предназначен для последующей установки ПО на рабочие места пользователей.

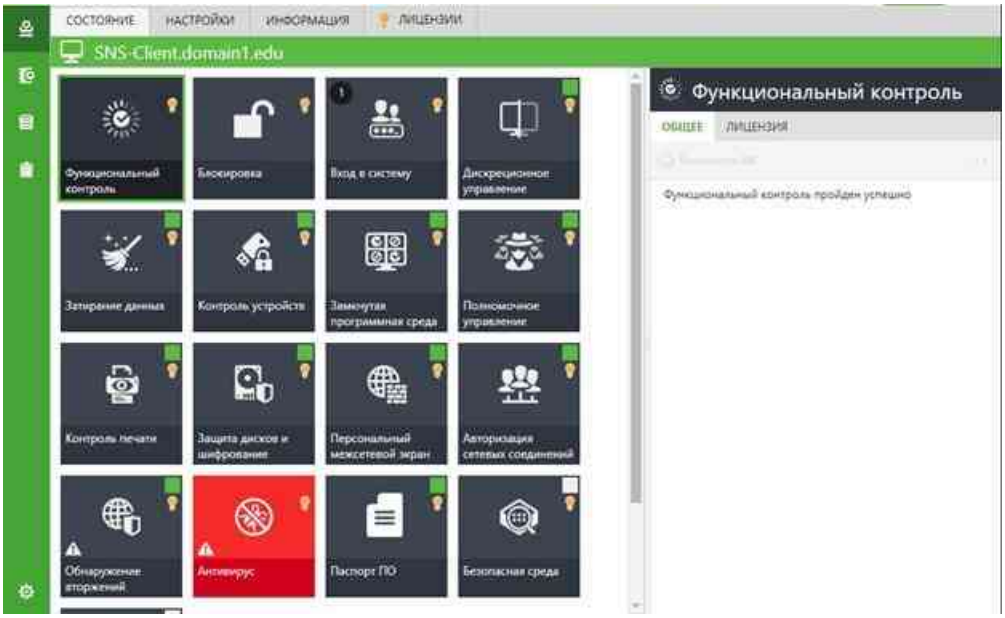


Рисунок 4 – Список возможных выполнений сценариев на локальном и централизованном центре управления

В состав системы Secret Net Studio входит механизм дискреционного управления доступом к ресурсам файловой системы. Этот механизм обеспечивает:

– разграничение доступа пользователей к каталогам и файлам на локальных дисках на основе матрицы доступа субъектов (пользователей, групп) к объектам доступа;

– контроль доступа к объектам при локальных или сетевых обращениях, включая обращения от имени системной учетной записи;

– невозможность доступа к объектам в обход установленных прав доступа (если используются стандартные средства ОС или прикладные программы без собственных драйверов для работы с файловой системой).

В результате выполненной работы успешно осуществлены установка и настройка системы Secret Net Studio в условиях виртуальной среды в соответствии с техническими требованиями. После завершения настройки система запущена в опытную эксплуатацию в условиях учебно-исследовательской лаборатории СарФТИ, стабильность её работы подтверждена практическими тестами и актуальным мониторингом. Обеспечена корректная работа системы, настроены необходимые параметры для контроля доступа, аудита и защиты информации. Все задачи по администрированию, включая управление пользователями, права доступа и сохранение безопасности данных, выполнены в полном объёме. Таким образом, система функционирует стабильно, что подтверждает эффективность проведённых работ и правильность выбранного подхода к настройке и администрированию Secret Net Studio. СЗИ Secret Net Studio вызывает определенный интерес и, потенциально, необходимость внедрения в организациях государственных структур для обеспечения защиты конфиденциальной информации.

Список литературы:

1. В.Ю. Шевцов, Е.В. Булгакова. Программно-аппаратная защита локальных АРМ с использованием ПО Secret Net: Инфра-инженерия, 2024. – 80 с.

2. Средство защиты информации Secret Net Studio. Руководство администратора. Установка, удаление, обновление: RU.88338853.501400.001 91 2. © Компания "Код Безопасности", 2020. – 86 с.

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ Wi-Fi СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Устинов С. В., Голубенко М.А., Кузнецов М.С.

Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени В.Ф. Маргелова, г. Рязань

В современном мире беспроводные технологии играют ключевую роль в обеспечении доступа к информации. Беспроводные сети Wi-Fi стали неотъемлемой частью современного общества, обеспечивая мобильность и доступность информации. Это оборудование уже продолжительное время используется как в бытовых условиях, так и в промышленности, бизнесе. Рассмотрим, как функционирует оборудование для создания беспроводных сетей, его ключевые характеристиками, а также роль Wi-Fi в специальных миссиях.

Беспроводные сети Wi-Fi используют радиочастоты для передачи данных между устройствами [1]. В основе их работы лежат стандарты, разработанные Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE). На данный момент наиболее распространенными являются стандарты 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n и 802.11ac. Эти стандарты определяют скорости передачи данных, дальность действия и другие ключевые характеристики.

Wi-Fi оборудование включает в себя несколько основных категорий устройств [1-3]:

1.Точки доступа (AccessPoint, AP) — центральные устройства, обеспечивающие беспроводное подключение клиентских устройств к сети.

2.Маршрутизаторы с Wi-Fi модулем — комбинированные устройства, выполняющие функции маршрутизации и беспроводной передачи данных.

3.Клиенты — конечные устройства (ноутбуки, смартфоны, планшеты), оснащённые Wi-Fi адаптерами.

4.Антенны — устройства для усиления и направления сигнала.

Точки доступа являются основным элементом любой Wi-Fi сети. Они выполняют следующие функции:

1.Обеспечение беспроводного подключения устройств.

2.Управление клиентскими подключениями.

3.Обеспечение безопасности сети.

4.Контроль качества обслуживания (QoS).

Wi-Fi маршрутизаторы объединяют в себе функции:

1.Маршрутизации трафика между сетями.

2.Создания беспроводной точки доступа.

3.Построения локальной сети.

4. Обеспечения сетевой безопасности.

5. Антенны и усилители.

Применяемые антенны бывают:

1. Встроенные – интегрированные в основное оборудование.

2. Внешние – подключаемые отдельно для усиления сигнала.

3. Направленные – для создания связи на большие расстояния.

Развитие технологий Wi-Fi идёт по пути:

1. Увеличения скорости передачи данных.

2. Расширения диапазона частот.

3. Повышения энергоэффективности.

4. Улучшения безопасности.

Ключевые характеристики современных решений Wi-Fi включают скорость передачи данных, безопасность, стабильность соединения и возможность подключения большого количества устройств одновременно. В последние годы особое внимание уделяется вопросам безопасности, так как беспроводные сети подвержены рискам взлома и интерференции.

Существование надежных и защищенных беспроводных связей имеет критическое значение для специальных миссий. В специальных миссиях и операциях коммуникация часто решает судьбу миссий. Беспроводные сети Wi-Fi обеспечивают оперативные связи для обмена данными в режиме реального времени, что особенно важно в условиях динамичной боевой обстановки.

Одним из примеров использования Wi-Fi в специальных миссиях является применение мобильных точек доступа на месте аварий, в труднодоступных районах. Эти устройства могут быстро развертываться, позволяя специальным службам поддерживать связь, обмениваться информацией и координировать свои действия. Следует отметить, что Wi-Fi может быть интегрирован с другими технологиями, такими как спутниковая связь и LTE, что обеспечивает многоуровневую и защищенную сеть передачи данных [3-5].

Кроме того, в спасательных операциях, а также в борьбе с терроризмом или при проведении гуманитарных миссий, беспроводные сети помогают обеспечить быструю связь между различными подразделениями и службами. В условиях ограниченного доступа к

инфраструктуре Wi-Fi является ключевым инструментом для создания временных рабочих станций и обмена информацией.

Российская Объединенная приборостроительная корпорация создала комплекс связи для защищенной высокоскоростной передачи информации, в том числе с помощью Wi-Fi, на сотни километров базируемый на аэростатах.

Для организации высокоскоростных каналов связи в зоне проведения спасательных операций создан комплекс высокоскоростной передачи защищенной информации на сотни километров. Высокая дальность достигается за счет размещения специального оборудования на аэростатах, производимых «Объединенной приборостроительной корпорацией (ОПК)».

В состав комплекса входят аэростаты-ретрансляторы большого, среднего и малого объема со специальной аппаратурой связи на борту. Активная фазированная антенная решетка (ФАР), выступающая полезной нагрузкой для аэростатов, обеспечивает связь между подвижными и стационарными командными пунктами управления. Комплекс, созданный концерном «Созвездие» (входит в ОПК), может подниматься на высоту нескольких километров и передавать информацию одновременно по нескольким каналам на расстояние до 200 километров. С помощью этого комплекса можно быстро развернуть сеть надежной быстрой связи с рельефом местности любой ложности. В данный момент продолжаются опытные испытания оборудования связи.

Однако, следует учитывать, что использование беспроводных технологий ставит в современных реалиях множество вызовов. Это и угроза перехвата коммуникации конкурентами в сфере бизнеса, и возможность глушения сигнала. Поэтому для безопасной связи разрабатываются специальные протоколы безопасности и технологии шифрования данных, которые минимизируют риски.

Так, например, активно применяется технология Wi-Fi для создания защищенных каналов передачи данных включающие в себя:

1. Создание автоматизированных систем управления (АСУ).
2. Организация связи между спасательными подразделениями.
3. Передача данных и видеоинформации.
4. Интеграция различных видов систем.

Применение специализированных радиостанций широкополосного доступа, работающих на базе Wi-Fi технологии:

1. Радиостанции МРА, МРД и другие модификации.
2. Системы с канальной скоростью до 54 Мбит/с
3. Работа в диапазонах 500-645 МГц и 1,5-1,75 ГГц

Особенностью специальных Wi-Fi систем является защищенные сети обладающие следующими характеристиками:

4. Возможность создания Mesh-сетей (ячеистых сетей).
5. Дальность связи до 6 км между узлами.
6. При использовании высокоподнятых антенн - до 26 км на пролет.
7. Общая протяженность линии связи до 130-150 км.

Специальные Wi-Fi сети имеют особое значение для обеспечения связи и передачи данных спасательными подразделениями. Однако, в связи с повышенными требованиями к безопасности спасательных операций, безопасность специальных Wi-Fi сетей становится ключевым аспектом их функционирования. Основными требованиями безопасности Wi-Fi сетей являются конфиденциальность, целостность и доступность данных. Конфиденциальность данных означает, что информация, передаваемая по Wi-Fi сетям, должна быть защищена от несанкционированного доступа третьих лиц. Целостность данных подразумевает, что данные не должны подвергаться изменениям в процессе передачи. Доступность данных означает, что данные должны быть доступны в нужное время и в нужном месте для обеспечения эффективности военных операций. Для обеспечения конфиденциальности данных Wi-Fi сети должны использовать современные методы шифрования, такие как протоколы WPA3, которые обеспечивают высокий уровень защиты информации от перехвата злоумышленниками. Также важно использовать средства аутентификации, чтобы исключить возможность подключения к сети несанкционированных устройств. Для обеспечения целостности данных необходимо использовать методы контроля целостности, такие как цифровые подписи и хеширование данных. Эти методы позволяют обнаруживать любые изменения данных в процессе передачи и предотвращать возможные атаки на целостность информации. Для обеспечения доступности данных Wi-Fi сети должны иметь резервные каналы связи и механизмы автоматического

восстановления после сбоев. Также важно проводить регулярное тестирование сети на отказоустойчивость и готовность к чрезвычайным ситуациям. Кроме того, важным аспектом безопасности таких Wi-Fi сетей является физическая защита оборудования. Серверы, маршрутизаторы и другое сетевое оборудование должны находиться в защищенных помещениях с ограниченным доступом, чтобы исключить возможность физического доступа злоумышленников к сети. Таким образом, требования безопасности Wi-Fi сетей включают в себя конфиденциальность, целостность и доступность данных, использование современных методов шифрования, контроля целостности и физической защиты оборудования. Соблюдение этих требований позволит обеспечить надежную и безопасную работу специальных Wi-Fi сетей в условиях повышенной угрозы безопасности [1,3,6].

Создание независимого специального интернета для спасательных служб представляет собой важную задачу для обеспечения безопасности и конфиденциальности информации, передаваемой такими сетями. В современном мире, где цифровые угрозы становятся все более сложными и утонченными, необходимо обеспечить надежную защиту передаваемых данных и сетевой инфраструктуры. Одним из ключевых аспектов создания независимого интернета является обеспечение высокого уровня безопасности Wi-Fi сетей, используемых спасательными специальными подразделениями. Такие Wi-Fi сети должны соответствовать особым требованиям безопасности, учитывая специфику деятельности специальных подразделений и возможные угрозы, с которыми они могут столкнуться. Одним из основных принципов обеспечения безопасности Wi-Fi сетей является минимизация передачи личной информации через общедоступные Wi-Fi сети. Специальные подразделения должны строго соблюдать правила и рекомендации по использованию только защищенных сетей для передачи конфиденциальной информации, чтобы избежать утечек и несанкционированного доступа к данным. Для обеспечения безопасности Wi-Fi сетей необходимо использовать передовые технологии шифрования данных. Шифрование данных военных сетей помогает защитить информацию от несанкционированного доступа и обеспечить ее конфиденциальность. Различные методы шифрования, такие как AES (AdvancedEncryptionStandard) и WPA3 (Wi-FiProtectedAccess 3), могут быть применены для защиты данных Wi-Fi сетей. Управление доступом Wi-Fi сетей также играет важную роль в обеспечении безопасности [3,6-8]. Системы контроля доступа позволяют ограничить доступ к сети только авторизованным пользователям и устройствам, что помогает предотвратить несанкционированный доступ и атаки на сетевую инфраструктуру. Анализ уязвимостей специальных Wi-Fi сетей является неотъемлемой частью обеспечения их безопасности. Проведение регулярного аудита и тестирования на проникновение позволяет выявить потенциальные уязвимости и устранить их до того, как они будут использованы злоумышленниками. Физическая безопасность специальных Wi-Fi сетей также играет важную роль. Защита сетевого оборудования и инфраструктуры от несанкционированного доступа, кражи или повреждения помогает предотвратить физические атаки на сеть и обеспечить ее бесперебойную работу. Мониторинг и обнаружение инцидентов специальных Wi-Fi сетей позволяет оперативно реагировать на возможные угрозы и атаки. Системы мониторинга и обнаружения инцидентов позволяют выявлять аномальное поведение в сети и принимать меры по предотвращению угроз. Обучение персонала по безопасности специальных Wi-Fi сетей является важным аспектом обеспечения безопасности. Подготовленный и информированный персонал способен правильно использовать сетевые ресурсы, соблюдать правила безопасности и реагировать на возможные угрозы. Сравнительный анализ безопасности различных Wi-Fi сетей позволяет выявить различия в требованиях и подходах к обеспечению безопасности. Специальные Wi-Fi сети обладают особыми характеристиками и требованиями, которые необходимо учитывать при разработке и эксплуатации сетевой инфраструктуры. Таким образом, создание независимого интернета требует комплексного подхода к обеспечению безопасности специальных Wi-Fi сетей. Соблюдение требований безопасности, использование передовых технологий шифрования, управление доступом, анализ уязвимостей, физическая безопасность, мониторинг и обнаружение инцидентов, обучение персонала и сравнительный анализ - все эти аспекты играют важную роль в обеспечении надежной защиты военных сетей от цифровых угроз.

К современным и перспективным разработкам можно отнести аэростатные комплексы представляющие новое направление развития специальных Wi-Fi систем, которые включают возможность подъема на высоту нескольких километров, радиус действия до 250 км, автоматическое отслеживание принимающих устройств, работу без сигналов ГЛОНАСС и GPS, защищенность связи за счет точечного направления сигналов.

Развитие технологий радиостанций широкополосного доступа (радиостанций Wi-Fi) играет ключевую роль в обеспечении связи и передачи данных в специальных сетях [3,9]. Специальные Wi-Fi сети имеют особые требования к надежности, скорости передачи данных и конфиденциальности информации, что делает использование современных технологий радиостанций широкополосного доступа важным аспектом в обеспечении безопасности специальных коммуникаций. Одной из ключевых особенностей технологий радиостанций широкополосного доступа в сетях специального предназначения является способность обеспечивать защищенное соединение и передачу данных. Для этого широко применяются различные методы шифрования, аутентификации и управления доступом. Технологии радиостанций широкополосного доступа в специальных сетяхсетях должны соответствовать высоким стандартам безопасности, чтобы исключить возможность несанкционированного доступа к данным и сбоев в работе сети. С развитием технологий радиостанций широкополосного доступа в специальных сетях появляются новые возможности для обеспечения защиты информации и повышения эффективности коммуникаций. Например, использование технологии множественного входа-множественного выхода (MIMO) позволяет увеличить пропускную способность и надежность передачи данных в условиях ограниченной радиочастотной полосы. Также технологии радиостанций широкополосного доступа включают в себя методы динамического управления частотным спектром, что позволяет эффективно использовать доступные радиочастотные ресурсы и обеспечивать стабильную работу сети даже в условиях помех и перегрузок. Одним из важных аспектов технологий радиостанций широкополосного доступа в специальных сетях является обеспечение защиты от кибератак и внешних угроз. Для этого применяются средства обнаружения и предотвращения атак, а также методы шифрования и аутентификации, которые позволяют защитить передаваемую информацию от несанкционированного доступа и искажения. Технологии радиостанций широкополосного доступа в специальных сетях должны быть способными оперативно реагировать на угрозы и обеспечивать непрерывную работу сети даже в условиях кибератак. Таким образом, развитие технологий радиостанций широкополосного доступа играет важную роль в обеспечении безопасности специальных Wi-Fi сетей. Применение современных методов шифрования, аутентификации и управления доступом позволяет защитить передаваемую информацию и обеспечить надежную работу сети в условиях повышенных требований к безопасности. Внедрение новейших технологий радиостанций широкополосного доступа вспециальных сети позволяет повысить эффективность коммуникаций и обеспечить защиту информации от внешних угроз.

Шифрование данных в специальных Wi-Fi сетях играет ключевую роль в обеспечении безопасности передаваемой информации и защите от потенциальных угроз [3,10-11]. В контексте специальныхспасательных операций, где конфиденциальность, целостность и доступность данных имеют высший приоритет, использование надежных шифровальных методов становится необходимостью. Одним из основных методов обеспечения безопасности специальных Wi-Fi сетей является шифрование данных. Шифрование позволяет преобразовать информацию в нечитаемый для посторонних вид, обеспечивая конфиденциальность передаваемых данных. В контексте Wi-Fi сетей, где данные передаются по беспроводному каналу, защита информации от несанкционированного доступа становится особенно важной. Для обеспечения шифрования данных в специальных Wi-Fi сетях широко применяются различные протоколы и алгоритмы шифрования. Один из наиболее распространенных протоколов - WPA2 (Wi-FiProtectedAccess 2), который обеспечивает защиту данных с помощью алгоритма AES (AdvancedEncryptionStandard). AES является одним из самых надежных алгоритмов симметричного шифрования и обеспечивает высокий уровень безопасности передаваемой информации. Кроме того, для защиты данных в специальных Wi-Fi сетях часто применяются дополнительные механизмы шифрования, такие как VPN (VirtualPrivateNetwork). VPN создает защищенный туннель для передачи данных через общедоступные сети, обеспечивая конфиденциальность и целостность информации даже при использовании небезопасных сетей. Важным аспектом шифрования данных в военных Wi-Fi сетях является также управление ключами шифрования. Ключи шифрования играют решающую роль в обеспечении безопасности передаваемой информации, поэтому необходимо обеспечить их генерацию, распределение и хранение в надежном виде. Ключи шифрования должны быть долгими, сложными и регулярно обновляемыми для предотвращения возможных атак на данные. Помимо технических аспектов шифрования данных, важно также обеспечить обучение персонала по правилам безопасности при работе с военными Wi-Fi сетями. Пользователи

должны быть осведомлены о методах шифрования, правилах безопасного обращения с данными и процедурах реагирования на возможные инциденты безопасности. В заключение, шифрование данных играет важную роль в обеспечении безопасности специальных Wi-Fi сетей, обеспечивая конфиденциальность, целостность и доступность передаваемой информации. Эффективное шифрование данных, совместно с другими мерами безопасности, позволяет минимизировать риски утечки информации и обеспечить защиту важных специальных данных от потенциальных угроз.

Военные сети должны строго контролировать доступ к своим ресурсам, чтобы предотвратить несанкционированный доступ и утечку конфиденциальных данных. Один из основных методов управления доступом в специальных Wi-Fi сетях - это аутентификация пользователей. Пользователи должны проходить процедуру аутентификации перед тем, как получить доступ к сети. Для этого могут использоваться различные методы, такие как аутентификация по паролю, сертификатам, биометрическим данным и т.д. Кроме того, часто применяется двухфакторная аутентификация для повышения уровня безопасности. Для более тщательного контроля доступа в специальных Wi-Fi сетях также применяются различные методы авторизации. Авторизация определяет, какие ресурсы сети могут быть доступны для конкретного пользователя после успешной аутентификации. Настройка прав доступа к ресурсам сети должна быть строго регулируема и контролируема администраторами сети. Для обеспечения безопасности специальных Wi-Fi сетей также широко используются технологии контроля доступа. Это включает в себя использование виртуальных частных сетей (VPN), механизмы шифрования трафика, фильтрацию пакетов данных и другие методы, направленные на предотвращение несанкционированного доступа и защиту передаваемой информации. Особое внимание в управлении доступом в специальных Wi-Fi сетях следует уделить мониторингу и аудиту сетевой активности. Системы мониторинга позволяют выявлять подозрительную активность, аномалии в сети и потенциальные угрозы безопасности. Аудит сетевой активности позволяет проводить регулярную проверку соответствия политикам безопасности и выявлять возможные нарушения. Важным аспектом управления доступом в специальных Wi-Fi сетях является также обучение персонала. Пользователи сети должны быть осведомлены о правилах безопасности, процедурах аутентификации и авторизации, а также о методах защиты информации. Регулярное обучение персонала помогает снизить риск человеческого фактора в обеспечении безопасности сети. Таким образом, управление доступом в специальных Wi-Fi сетях играет важную роль в обеспечении безопасности и защите конфиденциальности передаваемой информации. Применение современных методов аутентификации, авторизации, контроля доступа, мониторинга и обучения персонала позволяет создать надежную защиту сети от различных угроз и атак.

Специальные Wi-Fi сети играют ключевую роль в обеспечении связи и передаче данных спасательными подразделениями [1,3,10]. Однако, как и любая другая сеть, они подвержены различным уязвимостям, которые могут быть использованы злоумышленниками для несанкционированного доступа к конфиденциальной информации или нарушения работы сети. В данной статье мы рассмотрим основные уязвимости, которые могут возникнуть специальных Wi-Fi сетях, и способы их предотвращения. Одной из основных специальных Wi-Fi сетей является отсутствие или недостаточный уровень шифрования данных. В случае использования слабых шифров или их отсутствия, злоумышленники могут перехватывать и анализировать передаваемую информацию, что может привести к утечке конфиденциальных данных. Для защиты от этой уязвимости необходимо использовать современные шифровальные алгоритмы и протоколы, такие как WPA3, которые обеспечивают надежную защиту данных. Еще одной распространенной уязвимостью является недостаточная аутентификация пользователей. Если злоумышленники получат доступ к учетным данным пользователя, они смогут легко проникнуть в сеть под ложным именем и получить доступ к конфиденциальной информации. Для предотвращения этой уязвимости необходимо использовать механизмы двухфакторной аутентификации и регулярно обновлять пароли. Еще одним важным аспектом безопасности является управление доступом к сети. Недостаточно просто защитить саму сеть, необходимо также контролировать доступ пользователей к различным ресурсам и сервисам. Это позволит предотвратить несанкционированный доступ к конфиденциальной информации и снизить риск утечки данных. Кроме того, важно обеспечить физическую безопасность специальных Wi-Fi сетей. Физический доступ к оборудованию сети может быть использован злоумышленниками для установки вредоносного программного обеспечения или перехвата данных. Для защиты от этой уязвимости необходимо ограничить доступ к оборудованию и обеспечить его постоянный

мониторинг. Важным аспектом безопасности является также мониторинг и обнаружение инцидентов в сети. Регулярный мониторинг трафика позволяет выявлять аномальное поведение пользователей или попытки несанкционированного доступа, что позволяет быстро реагировать на угрозы и предотвращать утечку данных. В заключение, безопасность специальных Wi-Fi сетей играет критическую роль в обеспечении защиты конфиденциальной информации и нормальной работы спасательных подразделений. Понимание основных уязвимостей и применение соответствующих мер безопасности позволит минимизировать риски и обеспечить надежную защиту сети.

Объекты и сооружения особой важности, где развернуты такие сети, должны быть защищены от несанкционированного доступа, физических повреждений и других угроз Одним из первостепенных моментов является выбор места размещения оборудования Wi-Fi сети. Объекты и сооружения особой важности должны иметь специально отведенные и защищенные помещения для размещения маршрутизаторов, точек доступа и другого сетевого оборудования. Эти помещения должны быть доступны только авторизованному персоналу и оборудованы системами контроля доступа, видеонаблюдения и сигнализации. Для обеспечения физической безопасности важно также использовать специализированные средства и методы защиты. К таким методам относятся установка металлических решеток на окна и вентиляционные отверстия, применение усиленных дверей с современными замками и системами контроля доступа, а также использование физических барьеров вокруг объекта. Для предотвращения несанкционированного доступа к оборудованию Wi-Fi сети необходимо установить строгие правила и процедуры по работе с оборудованием. Весь персонал, имеющий доступ к сети, должен проходить обучение по правилам безопасности и быть ознакомлен с процедурами реагирования на инциденты. Особое внимание следует уделить защите от физических угроз, таких как вандализм, кража оборудования или подмена аппаратных средств. Для этого необходимо проводить регулярные инспекции и проверки оборудования, контролировать поставки и перемещения оборудования, а также использовать маркировку и инвентаризацию для идентификации каждого устройства. Кроме того, важно учитывать физическую безопасность при планировании и строительстве инфраструктуры специальных Wi-Fi сетей. Необходимо предусмотреть резервные и автономные источники питания, защиту от электромагнитных помех и воздействий, а также обеспечить герметичность и устойчивость к экстремальным условиям. В заключение, физическая безопасность является неотъемлемой частью общей системы защиты военных Wi-Fi сетей. Только комплексный подход, включающий технические, организационные и физические меры, позволит обеспечить надежную защиту сетевой инфраструктуры от различных угроз и атак. Регулярное обновление и совершенствование системы физической безопасности позволит сохранить высокий уровень защиты объектов и информации, передаваемой по Wi-Fi сетям.

В заключении можно отметить, что оборудование Wi-Fi сетей постоянно совершенствуется, обеспечивая всё более высокие скорости передачи данных и надёжность соединения. Современные и перспективные возможности позволяют реализовать самые амбициозные варианты инфраструктуры, обеспечивая пользователей комфортным доступом к информации в любой точке покрытия при создании защищенных каналов связи, организации систем управления и координации действий различных подразделений специальных служб. Уже сегодня и в ближайшей перспективе современные решения позволяют создавать масштабные сети с высокой пропускной способностью с защитой передаваемой информации.

Список литературы:

1 Олифер, Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы :учебник для вузов. 3-е изд. / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – Санкт-Петербург : Питер, 2006. – 842 с.
2 https://www.vesti.ru/article/1548589/
3Отчет о выполнении индивидуального задания на стажировку доцента кафедры первичных сетей связи гв. подполковника УСТИНОВА С.В.
4 Захарченко, Н. В. Передача дискретных сообщений :учебник для высших учебных заведений / В. П. Шувалов, Н. В. Захарченко, В.О. Шварцман. – Москва : Редакция литературы по радиотехники и электросвязи, 1990. – 463 с.
5 Жилин, В.В. Технология беспроводного доступа в телекоммуникационных системах: учеб. Пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. Текстовые, граф. Данные (1,8 Мб) / В.В. Жилин. – Воронеж ФГБОУ ВО Ж721 «Воронежский государственный технический университет», 2018. ISBN978-5-7731-0596-1.

6 Шахнович, В.И. Современные технологии беспроводной связи / И.В. Шахнович. – М.; Техносфера, 2022. – 322с.
7 Белецкий, А. Ф. Теория линейных электрических цепей / А. Ф. Белецкий.– Москва : Лань, 2021. – 544 с.
8 Мардер, Н. С. Современные телекоммуникации / Н. С. Мардер. – Москва : ИРИАС, 2017 – 230 с.
9 Руденков, Н. А. Основы сетевых технологий : учебник для вузов / Н. А. Руденков, Л. И. Долинер. – Екатеринбург : Издательство Уральского Федерального университета, 2011. – 300 с.
10 https://tass.ru/ekonomika/
11https:/ dzen.ru/a/от 31.05.25

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИСКРЕЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ КАК КОНЕЧНЫЙ АВТОМАТ С КОНТЕКСТНО-ЗАВИСИМЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Кузнецова А.М.
Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Саров

В системах управления инженерными данными (PLM) права доступа к объектам, таким как конструкторские чертежи, зависят от этапа жизненного цикла изделия. Например, чертеж в статусе «Черновик» может редактироваться, а после перехода в статус «Выпущено» должен быть доступен только для чтения. Классические модели дискреционного управления доступом (например, модель Харрисона — Руззо — Ульмана, HRU) не учитывают динамику изменения статуса объектов и не связывают права доступа с их жизненным циклом [1]. Это создает разрыв между прикладными требованиями систем управления жизненным циклом и формальными методами верификации политик безопасности [2-3].

В настоящей работе предложена математическая модель дискреционного управления доступом в виде конечного автомата, состояние которого включает как матрицу прав доступа, так и функцию контекста (этапа жизненного цикла объекта). Формально состояние определяется как пара $Q = (M, c)$, где $M: S \times O \to 2^R$ — матрица прав, $c: O \to C$ — функция контекста, S — множество субъектов, O — множество объектов, R— множество прав, C — множество контекстов [4].

Правила перехода разделены на два типа. Операции над правами ($grant$, $create_object$) изменяют матрицу доступа, но не влияют на контекст. Операции смены контекста ($promote$) переводят объект из одного статуса в другой при наличии у субъекта специального права и разрешенного перехода в графе контекстов, который предполагается ацикличным [5].

Для оценки безопасности системы сформулированы инварианты — условия, которые должны выполняться во всех достижимых состояниях. Основной инвариант целостности данных: если объект находится в финальном статусе «Выпущено», ни один субъект не должен обладать правом на его изменение. Формально:

$$\forall s \in S, \qquad \forall o \epsilon^{O}: \big(c(o) = C_{final}\big) \Rightarrow \big(write \notin M(s, o)\big)$$

Доказана теорема о достижимости безопасных состояний: если граф переходов контекстов ацикличен и для каждого перехода существует субъект с правом $promote$, то система гарантированно может перевести все объекты в финальный статус с выполнением инварианта безопасности [6].

Предложен алгоритм проверки инвариантов на основе ограниченного обхода пространства состояний. Алгоритм последовательно перебирает достижимые состояния, проверяя выполнение заданных условий, что позволяет выявлять нарушения политик безопасности на этапе верификации [7].

Применимость модели продемонстрирована на примере жизненного цикла чертежа в PLM-системе. В начальном статусе «Черновик» инженер обладает правами на редактирование. После перевода чертежа в статус «Выпущено» право на изменение автоматически удаляется, что обеспечивает целостность утвержденной документации.

Предложенная модель может быть применена не только в PLM-системах, но и в документообороте (стадии: проект → согласование → утверждение → архив), банковских транзакциях (инициирована → авторизована → исполнена).

Таким образом, в работе построена формальная модель дискреционного управления доступом с контекстно-зависимыми переходами, обобщающая классическую HRU-модель. Доказаны достаточные условия достижимости безопасных состояний, разработан алгоритм верификации инвариантов. Перспективы дальнейших исследований включают применение

символьных методов верификации и расширение модели на стохастические переходы для анализа рисков.

Список литературы:

1. Harrison M.A., Ruzzo W.L., Ullman J.D. Protection in operating systems // Communications of the ACM. – 1976. – Vol. 19, No. 8. – P. 461-471.
2. Гайдамакин Н.А. Разграничение доступа к информации в автоматизированных системах. – Екатеринбург: УрФУ, 2020. – 184 с.
3. Савельев А.И. Управление жизненным циклом данных в корпоративных системах // Информационные технологии. – 2022. – Т. 28, № 5. – С. 231-240.
4. Петров Н.Н., Сидоров А.А. Конечные автоматы в задачах информационной безопасности // Труды Института системного программирования РАН. – 2023. – Т. 35, № 2. – С. 115-128. – DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(2)-8.
5. Колесников А.В. Модели управления доступом в современных СУБД // Открытые системы. СУБД. – 2021. – № 3. – С. 42-48.
6. Васильев П.С. Методы верификации политик безопасности // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 4. – С. 56-64.
7. Николаев А.И. Применение теории автоматов в задачах контроля доступа // Международная конференция «Информационная безопасность – 2025»: сборник трудов. – М.: МГТУ, 2025. – С. 89-97.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖИЛ RGB КАБЕЛЯ VGA НА ЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Маскайкин А.В.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Электромагнитные излучения (ЭМИ), возникающие в процессе функционирования средств вычислительной техники (СВТ), традиционно рассматриваются как побочный фактор, создающий риски утечки информации по электромагнитному техническому каналу [1], [2], [3]. В то же время данные излучения могут быть использованы для организации дублирующих каналов связи в условиях сложной помеховой обстановки [4]. Одним из передатчиков в таком канале, имеющим высокий КПД, является видеосистема СВТ [5] [6], [7], при циркулировании в которой информации по интерфейсу VGA формируются аналоговые сигналы, распространяющиеся по кабелю VGA, что приводит к возникновению ЭМИ в широком диапазоне частот [5], [6]. На ЭМИ кабеля VGA оказывают влияние все его жилы, по которым циркулирует информация – жилы Red, Green, Blue (RGB). В открытых источниках отсутствует информация по влиянию данных жил на ЭМИ кабеля VGA, в связи с этим **актуальной** является задача исследования ЭМИ жил RGB как отдельно, так и в совокупности друг с другом.

Исследование электромагнитного излучения VGA кабеля

Формирование изображения на экране монитора осуществляется в аддитивной цветовой модели RGB, в которой каждый пиксель задается тремя компонентами: красной (R), зелёной (G) и синей (B). Каждая из компонент передается по отдельной сигнальной жиле VGA-кабеля в виде аналогового напряжения, величина которого определяет яркость соответствующего цвета. Данная особенность позволяет рассматривать каждую цветовую жилу как отдельный источник электромагнитного излучения.

Методика исследования заключается в поочередном физическом отключении отдельных цветовых жил и измерении уровня ЭМИ при выводе на экран монитора тестовых изображений.

В результате проведенных измерений установлено, что уровень ЭМИ кабеля VGA зависит от активной цветовой компоненты передаваемого изображения, однако максимальный уровень излучения наблюдается для различных цветовых жил на разных частотах.

Проведено исследование ЭМИ кабеля VGA в качестве передатчика в дублирующем канале связи, в ходе которого показано, что максимальное ЭМИ передатчика достигается при обработке им изображения со следующими цветовыми компонентами: R, RG и GB.

В таблице 1 представлены обобщённые результаты измерений.

Таблица 1 – Обобщение результатов измерений

Частота\Цвет	1,188 ГГц	1,2176 ГГц	1,336 ГГц
Красный (R)	-79 дБмВ	-98 дБмВ	-76 дБмВ
Зелёный (G)	-70 дБмВ	-86 дБмВ	-63 дБмВ
Синий (B)	-73 дБмВ	-84 дБмВ	-76 дБмВ
Красный-зелёный (RG)	-73 дБмВ	-95 дБмВ	-80 дБмВ
Зелёный-синий(GB)	-76 дБмВ	-95 дБмВ	-83 дБмВ

Список литературы:

1. Оценка возможности применения SDR-приемника для проведения специальных исследований / С. В. Груздев, А. А. Евстифеев, А. А. Казаков, Б. А. Красильников // Теория и практика обеспечения информационной безопасности: Сборник научных трудов по материалам всероссийской научно-теоретической конференции, Москва, 03 декабря 2021 года. – Москва: Московский технический университет связи и информатики, 2021. – С. 311-317. – EDN IOFEZL.
2. Красильников, Б. А. Исследование информативного побочного электромагнитного излучения средств вычислительной техники, передаваемого по скрытому каналу связи / Б. А. Красильников, Д. Б. Николаев // Математика и математическое моделирование : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XVI ВСЕРОССИЙСКОЙ МОЛОДЕЖНОЙ НАУЧНО-ИННОВАЦИОННОЙ ШКОЛЫ, Саров, 05–07 апреля 2022 года. – Саров: Интерконтакт, 2022. – С. 55-57. – EDN VJPLJK.
3. Красильников, Б. А. Относительная оценка эффективности организации электромагнитных каналов утечки информации / Б. А. Красильников // Математика и математическое моделирование : Сборник материалов XVIII Всероссийской молодёжной научно-инновационной школы, Саров, 10–12 апреля 2024 года. – Саров: ООО "Интерконтакт", 2024. – С. 44-45. – EDN XXZGRB.
4. Красильников, Б. А. Исследование перспективных скрытых каналов связи за счет электромагнитных излучений / Б. А. Красильников // XXVI Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные науки) : Материалы конференции, Нижний Новгород, 25–28 мая 2021 года. – Нижний Новгород: Издательство "Перо", 2021. – С. 49-51. – EDN ZGFHJO.
5. Красильников, Б. А. Оценка возможности управления источниками электромагнитного излучения вычислительной техники / Б. А. Красильников, А. И. Казарин // Математика и математическое моделирование : Сборник материалов XVIII Всероссийской молодёжной научно-инновационной школы, Саров, 10–12 апреля 2024 года. – Саров: ООО "Интерконтакт", 2024. – С. 45-46. – EDN JYNZZA.
6. Красильников, Б. А. Оценка эффективности источников ЭМИ по их вероятности обнаружения / Б. А. Красильников, Д. Б. Николаев // Математика и математическое моделирование : Сборник материалов XVIII Всероссийской молодёжной научно-инновационной школы, Саров, 10–12 апреля 2024 года. – Саров: ООО "Интерконтакт", 2024. – С. 42-43. – EDN JIKDKH.
7. Красильников, Б. А. оценка эффективности источников ЭМИ по их КПД / Б. А. Красильников, А. А. Евстифеев // Математика и математическое моделирование : Сборник материалов XVIII Всероссийской молодёжной научно-инновационной школы, Саров, 10–12 апреля 2024 года. – Саров: ООО "Интерконтакт", 2024. – С. 41-42. – EDN CNLAMU.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ СИММЕТРИЧНОГО ШИФРОВАНИЯ

Шувалов Е.А., Ясюк В.О.

Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Традиционная криптография опирается на математически строгие алгоритмы (AES, RSA), которые считаются стойкими, если их взлом требует непрактично больших вычислительных ресурсов. Однако с развитием методов машинного обучения возникает вопрос: могут ли нейронные сети самостоятельно открыть принципы шифрования, не имея априорных знаний о криптографии?

Исследователи Мартин Абади и Дэвид Андерсен из Google Brain поставили эксперимент: они создали три нейронные сети – Алису (отправитель), Боба (получатель) и Еву (перехватчик). Задача Алисы и Боба – научиться скрывать содержимое сообщения от Евы,

используя общий секретный ключ, при этом никакие готовые алгоритмы шифрования им не предписывались. Ева, напротив, стремится восстановить исходное сообщение по перехваченному шифротексту [1-3].

В системе действуют три нейросетевых агента: Алиса (Alice) – шифратор. Получает на вход два вектора длины N бит: исходное сообщение P (plaintext) и секретный ключ K. Генерирует шифротекст C (ciphertext) также длины N, Боб (Bob) – дешифратор. Получает шифротекст C от Алисы и тот же секретный ключ K. Должен восстановить исходное сообщение P_Bob и Ева (Eve) – перехватчик. Получает только шифротекст C и пытается восстановить исходное сообщение P_Eve.

Все коммуникации происходят по открытому каналу. Ева пассивна (не может изменять сообщения), но перехватывает все пакеты. Ключ K уникален для каждого сообщения и заранее известен только Алисе и Бобу.

Входные данные представляются не как биты {0, 1}, а как значения {-1, 1}. Это сделано для улучшения сходимости градиентных методов – нулевое значение в традиционном представлении затрудняет вычисление градиентов. Длина сообщения и ключа (N) в базовом эксперименте равна 16 бит.

Авторы использовали архитектуру, названную "mix and transform":

1. Mix (Перемешивание): Входные данные (сообщение + ключ для Алисы; шифротекст + ключ для Боба; только шифротекст для Евы) сначала проходят через один или несколько полносвязных (dense) слоев. Это позволяет сети научиться перемешивать биты, чтобы зависимость выходных битов от входных стала сложной.

2. Transform (Преобразование): Затем данные проходят через серию сверточных слоев (Conv1D), которые применяют преобразования к группам битов. Этот этап отвечает за нелинейное искажение сигнала.

Архитектура сетей:

Компонент	Алиса (Alice)	Боб (Bob)	Ева (Eve)
Вход 1	Сообщение P (16)	Шифротекст C (16)	Шифротекст C (16)
Вход 2	Ключ K (16)	Ключ K (16)	—
Вход (общий)	Конкатенация [P, K] (32)	Конкатенация [C, K] (32)	C (16)
Слой 1	Dense (32 → 32)	Dense (32 → 32)	Dense (16 → 32)
Слой 2	—	—	Dense (32 → 32)
Сверточный блок	4 слоя Conv1D	4 слоя Conv1D	4 слоя Conv1D
Выход	Шифротекст C (16)	Сообщение P_Bob (16)	Сообщение P_Eve (16)

Примечание: Сверточный блок работает с одномерными данными. Поскольку после dense-слоя данные имеют размерность (batch_size, 32), они преобразуются в (batch_size, 32, 1) для подачи в Conv1D, где последняя ось – "каналы". Свертка применяется вдоль последовательности битов.

Зачем Еве больше слоев? Ева не имеет доступа к ключу, поэтому ее задача сложнее. Дополнительный dense-слой дает ей больше вычислительной мощности, что делает состязание более честным и стимулирует Алису и Боба изобретать более стойкое шифрование.

Цель Евы – минимизировать разницу между своим выходом P_{Eve} и истинным сообщением P. Используется L1-норма (среднее абсолютной разности).

L_{Eve} = 1/N $\sum_{i=1}^{N}$ |P_i − P_{Eve_i}|

Так как биты кодируются как -1 и 1, идеальное восстановление дает 0, а случайное угадывание дает ошибку около 1.0 (поскольку среднее расстояние до правильного бита при случайном выборе равно 1).

Потери Алисы и Боба состоят из двух частей:

1. Потери восстановления Бобом: Боб должен точно восстановить сообщение. Эта часть аналогична L_{Eve}, но применяется к P_{Bob}.

2. Штраф за успехи Евы: Алиса и Боб должны минимизировать успехи Евы. Идеальная ситуация – когда Ева действует не лучше случайного угадывания (ошибка Евы ≈ 1.0). Отклонение от этого идеала в сторону меньшей ошибки (т.е. лучшего восстановления Евой) штрафуется.

L_{AB} = BobError + $\lambda(1.0 - \text{EveError})^2$.

В упрощенной реализации коэффициент λ часто опускают или принимают равным 1, а выражение адаптируют под конкретные значения ошибок. Квадратичная форма штрафа обеспечивает быстрое нарастание потерь, как только Ева начинает добиваться успеха [4].

Обучение происходит итеративно и не является стандартной минимизацией общей функции потерь:

1. Шаг Алисы и Боба: Замораживаются веса Евы. Обновляются веса Алисы и Боба для минимизации L_{AB}. Обычно выполняется 1 шаг.

2. Шаг Евы: Замораживаются веса Алисы и Боба. Обновляются веса Евы для минимизации L_{Eve}. Чтобы дать Еве преимущество в "гонке вооружений", для нее выполняется 2 шага обучения на каждый шаг Алисы и Боба.

Этот цикл повторяется тысячи раз. Динамика обучения напоминает эволюционный процесс, а не плавную сходимость: периоды, когда Ева начинает лучше понимать шифр, сменяются "изобретением" Алисой и Бобом нового, более сложного шифра, который снова ставит Еву в тупик.

На графике обучения отчетливо видны три фазы:

- начальная фаза (0–8000 шагов): все три сети действуют практически случайно. Ошибки высоки (около 1.5–2.0 в зависимости от масштаба);

- фаза обучения Евы (8000–10000 шагов): Ева начинает успешно восстанавливать сообщение (ее ошибка падает). Алиса и Боб тоже учатся общаться, но их шифр пока примитивен;

- фаза "изобретения" шифра (после 10000 шагов): Алиса и Боб находят способ использовать ключ для маскировки сообщения. Ошибка Евы резко возрастает и стабилизируется на уровне, близком к случайному угадыванию, в то время как Боб продолжает точно восстанавливать сообщение.

В типичном эксперименте с N=16: Боб: восстанавливает сообщение с точностью >99% (менее 0.1 бита ошибки в среднем), Ева: работает на уровне, лишь незначительно превышающем случайное угадывание. В среднем она может угадывать 8–9 бит из 16 (случайное угадывание даст 8), но не способна восстановить сообщение целиком.

Исследователи проанализировали поведение обученной Алисы. Они обнаружили:

- лавинный эффект: изменение одного бита в ключе или сообщении влияло не на один, а сразу на 3–6 бит выходного шифротекста. Это ключевое свойство хороших шифров, достигнутое сетью самостоятельно;

- некоррелированность: не наблюдалось прямой корреляции между конкретными битами ключа и сообщения в выходном шифротексте.

Важно понимать, что сеть не создала шифр, стойкий к любому мыслимому анализу. Она создала шифр, стойкий к конкретной архитектуре Евы и процессу ее обучения. Если после заморозки Алисы и Боба продолжать обучать Еву с еще большей вычислительной мощностью или другой архитектурой, она может со временем взломать шифр.

Отличие от классической криптографии [5, 6]:

- отсутствие математической гарантии: классическая криптография опирается на математически доказанную (или широко признанную) сложность задачи. Нейросеть дает лишь эмпирическую гарантию: "в ходе обучения Ева не смогла это взломать";

- неизвестный алгоритм: полученный "алгоритм" шифрования представляет собой множество весов нейросети. Его невозможно выписать в виде формулы, проанализировать или сертифицировать. Он непереносим и хрупок.

Были попытки реализовать асимметричный вариант (с открытым ключом). В этой схеме добавляется четвертая сеть – генератор ключей (KeyGen). Она создает пару (публичный, приватный ключ). Алиса шифрует сообщение публичным ключом Боба, а Боб расшифровывает своим приватным. Однако результаты оказались значительно хуже, чем в симметричном варианте. Ева часто восстанавливала большую часть сообщения, что говорит о высокой сложности задачи для данного подхода.

Эксперимент с состязательной нейрокриптографией (ANC) продемонстрировал важный принцип: нейронные сети способны самостоятельно, без явного программирования, вырабатывать стратегии сокрытия информации. Они открыли для себя ключевые принципы шифрования – зависимость выходных битов от многих входных (лавинный эффект) и использование секретного ключа.

Однако прямой практической ценности для создания промышленных криптосистем этот подход не имеет. Полученные алгоритмы неверифицируемы, непереносимы и не гарантируют

стойкость. Главная ценность работы – методологическая. Она показывает, как можно формулировать задачи обучения в терминах конкурирующих целей ("максимизируй точность на задаче А, но не позволяй решить задачу Б"), что открывает путь к созданию систем с охраной приватности (например, нейросети, которые учатся не раскрывать конфиденциальные признаки в своих внутренних представлениях).

Практическая реализация, описанная в данном докладе, подтверждает воспроизводимость этих результатов и позволяет глубже понять динамику состязательного обучения.

Список литературы:

1. Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Криптография и электроника / Под ред. А.И. Астайкина. 2-е издание, переработанное и дополненное. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2020. – 552 с.
2. Грибунин В.Г., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Криптография и безопасность цифровых систем: Учебное пособие. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2011. 411 с.
3. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
4. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
5. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
6. Грибунин, В.Г. Стеганографические системы. Цифровые водяные знаки / В.Г. Грибунин, В.Е. Костюков, А.П. Мартынов, Д.Б. Николаев, В.Н. Фомченко. – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2016. - 210 с.

АНАЛИЗ КРИТИЧЕСКИХ УЯЗВИМОСТЕЙ В ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Шпак Д.С., Ершов А.А., Кошкин В.В., Дорофеев С.А., Малоземов А.А.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Операционные системы (ОС) представляют собой фундаментальный слой любой информационной инфраструктуры. От их безопасности зависит устойчивость всей цифровой экосистемы – от персональных устройств до критической инфраструктуры. Однако сложность современных ОС, миллионы строк кода и постоянное появление новых функций неизбежно порождают уязвимости, которые становятся мишенью для злоумышленников [1].

Анализ критических уязвимостей операционных систем приобретает особую актуальность в условиях роста числа кибератак и усложнения их методов. Согласно отчету за 2026 год, в 2025 году было зафиксировано 146 эксплуатируемых уязвимостей высокого и критического уровня, что на 105% больше по сравнению с 2024 годом. Одновременно с этим каталог CISA Known Exploited Vulnerabilities (KEV) вырос с 1239 уязвимостей в конце 2024 года до 1484 в конце 2025 года, причём за год в него было добавлено 245 новых записей – рост на 20% по сравнению с предыдущим годом.

Целью доклада является исследование механизмов защиты операционных систем, включая перспективные технологии и российские разработки [2].

Анализ данных каталога CISA KEV за 2025 год позволяет выделить наиболее распространённые типы уязвимостей, активно эксплуатируемые злоумышленниками:

- OS Command Injection (CWE-78) – инъекция команд операционной системы, позволяющая злоумышленнику выполнять произвольные команды на целевой системе. В 2025 году этот тип составил 18 из 245 добавленных в каталог KEV уязвимостей;
- Deserialization of Untrusted Data (CWE-502) – некорректная десериализация данных, создающая возможности для удалённого выполнения кода;
- Path Traversal (CWE-22) – обход путей, позволяющий получить несанкционированный доступ к файлам за пределами разрешённой директории;
- Use-After-Free (CWE-416) – использование памяти после её освобождения, характерное для системного программного обеспечения;

- Out-of-bounds Write/Read (CWE-787, CWE-125) – выход за границы буфера, приводящий к повреждению памяти и потенциальному выполнению кода;

- Improper Authentication (CWE-287) – некорректная аутентификация, позволяющая обойти механизмы проверки подлинности.

Особого внимания заслуживает анализ наиболее опасных уязвимостей системного уровня. В отчёте «Vulnerability landscape analysis for Q1 2025» компании «Лаборатория Касперского» выделяются следующие типы уязвимостей, характерные для системного ПО: CWE-667 (Improper Locking – некорректная блокировка), CWE-125 (Out-of-bounds Read), CWE-908 (Use of Uninitialized Resource). Эти классы ошибок особенно критичны для операционных систем, поскольку они затрагивают низкоуровневые механизмы управления памятью и синхронизацией. Стандарт CVSS (Common Vulnerability Scoring System) остаётся основным инструментом количественной оценки критичности уязвимостей. Критическими считаются уязвимости с CVSS-оценкой 9,0–10,0. Однако, как показывает практика, даже уязвимости со средней оценкой могут представлять серьёзную угрозу при определённых условиях эксплуатации. MITRE, поддерживающая Common Weakness Enumeration (CWE), в 2025 году опубликовала обновлённый список CWE Top 25 Most Dangerous Software Weaknesses. Верхние позиции списка традиционно занимают проблемы, связанные с недостаточной валидацией входных данных и некорректным управлением доступом.

Особую категорию представляют уязвимости нулевого дня (zero-day vulnerabilities), которые эксплуатируются злоумышленниками до того, как становится доступным официальное исправление. В 2025 году было зафиксировано 90 уязвимостей нулевого дня, активно эксплуатировавшихся в атаках, по сравнению с 78 в 2024 году. Из этих 90 уязвимостей 47 были нацелены на платформы конечных пользователей, а 43 – на корпоративные продукты [3-5].

Особую тревогу вызывает тот факт, что в 2025 году 30% уязвимостей эксплуатировались ещё до официального раскрытия информации о них, что свидетельствует о росте сложности и оперативности действий злоумышленников.

Анализ трендов эксплуатации zero-day уязвимостей показывает, что всё большее число атак направлено на корпоративные системы, включая ОС серверов и рабочих станций. При этом мобильные ОС составили менее 10% от общего числа эксплуатируемых zero-day уязвимостей в 2025 году.

Анализ критических уязвимостей в различных ОС.

Уязвимости Windows.

Семейство операционных систем Microsoft Windows остаётся наиболее частой мишенью для атак в силу своей распространённости. В 2025–2026 годах был выявлен ряд критических уязвимостей, заслуживающих особого внимания.

CVE-2026-24291 (Windows Accessibility Infrastructure) – критическая уязвимость, позволяющая злоумышленнику повысить привилегии до уровня SYSTEM. Уязвимость получила оценку CVSS 3.1 – 7,8 балла. Эксплуатация этой уязвимости позволяет злоумышленнику, имеющему локальный доступ к системе, получить полный контроль над компьютером.

CVE-2026-25187 (Windows Winlogon) и CVE-2026-23669 (Windows Print Spooler) – ещё две критические уязвимости, отмеченные в дайджесте R-Vision за март 2026 года. Обе уязвимости связаны с компонентами, традиционно являющимися источниками проблем безопасности в Windows.

CVE-2026-21510 (Windows Shell Security Feature Bypass) – уязвимость, позволяющая обойти защитные механизмы Windows Shell, включая SmartScreen. Эксплуатация возможна через специально подготовленную ссылку или файл-ярлык. Специалисты Positive Technologies отмечают, что эта уязвимость могла использоваться в реальных атаках, возможно, в цепочке с другими уязвимостями.

Уязвимости файловой системы Windows (CVE-2026-20840) – два пробела в защите системного файла ntfs.sys, управляющего файловой системой NTFS, были обнаружены экспертом Positive Technologies. Вендор оценил уязвимость в 7 баллов по шкале CVSS. Проблемы в драйвере файловой системы особенно опасны, поскольку работают на самом низком уровне операционной системы.

Уязвимости Linux.

Ядро Linux, составляющее основу серверной инфраструктуры и встраиваемых систем, также демонстрирует рост числа выявляемых уязвимостей. После того как команда

разработчиков ядра Linux стала органом нумерации CVE (CNA) в 2024 году, количество публикуемых уязвимостей резко возросло. Общее количество CVE для ядра Linux в 2024 году достигло 3529 – десятикратный рост по сравнению с предыдущими годами. Эта тенденция сохранилась и в 2025 году.

CVE-2026-23438 (Linux Kernel mvpp2) – критическая уязвимость, связанная с разыменованием нулевого указателя в функции mvpp2_bm_switch_buffers компонента mvpp2. Уязвимость затрагивает ядро Linux вплоть до версии 7.0-rc4 и классифицируется как критическая.

CVE-2025-1272 (Linux Kernel Lockdown Mode) – уязвимость, затрагивающая режим блокировки ядра Linux (lockdown mode) для версий ядра начиная с 6.12 в Fedora Linux. Режим блокировки отключается без какого-либо предупреждения, что позволяет злоумышленнику получить доступ к чувствительной информации, включая отображения памяти ядра, порты ввода-вывода, BPF и kprobes.

AppArmor и другие компоненты безопасности – Qualys обнаружила несколько уязвимостей в AppArmor (включая CVE-2025-62626), позволяющих непривилегированному локальному злоумышленнику загружать, заменять и удалять произвольные профили AppArmor. Это демонстрирует, что даже специализированные механизмы безопасности не застрахованы от уязвимостей.

Проблемы файловых систем – уязвимость CVE-2025-71237 в nilfs2 может привести к зависанию системы при выполнении команды FITRIM из-за потенциального переполнения блока. Подобные проблемы демонстрируют, что уязвимости в драйверах файловых систем остаются актуальной проблемой.

Уязвимости macOS.

Экосистема Apple, традиционно считавшаяся более защищённой, также демонстрирует рост числа критических уязвимостей.

CVE-2026-20700 – уязвимость нулевого дня в dyld (Dynamic Link Editor), представляющая собой проблему повреждения памяти (CVSS 7,8). Злоумышленник может выполнить произвольный код при обработке вредоносного веб-контента. Известно, что эта уязвимость использовалась в связке с двумя другими уязвимостями – CVE-2025-14174 и CVE-2025-43529, которые Apple устранила ещё в декабре 2025 года.

CVE-2025-43529 – уязвимость использования области памяти после её освобождения (use-after-free) в WebKit, оценённая в 8,8 по шкале CVSS. Эта уязвимость затрагивает не только macOS, но и iOS и iPadOS, что демонстрирует распространение проблем безопасности на всю экосистему Apple.

CVE-2026-28817 – уязвимость типа «race condition» в Apple macOS, позволяющая процессам, работающим в изолированной среде (sandbox), обходить установленные ограничения безопасности.

CVE-2025-43508 – уязвимость раскрытия информации в macOS Tahoe, вызванная некорректной очисткой данных в механизмах системного логирования.

Современный арсенал методов анализа уязвимостей операционных систем включает как статические, так и динамические подходы [6].

Статический анализ исходного кода позволяет выявлять потенциальные уязвимости на ранних этапах разработки, не требуя выполнения программы. Для ядра Linux и компонентов ОС используются специализированные статические анализаторы, такие как Coverity, Clang Static Analyzer, а также инструменты на основе абстрактной интерпретации. Эти инструменты выявляют проблемы, связанные с выходом за границы буфера, использованием неинициализированной памяти, утечками ресурсов и другими распространёнными ошибками.

Однако статический анализ имеет ограничения: он не всегда способен выявить уязвимости, связанные с особенностями выполнения в конкретной среде, и может генерировать ложные срабатывания.

Фаззинг является одним из наиболее эффективных методов выявления уязвимостей в операционных системах. Исследование, посвящённое выявлению недостатков безопасности ядра Linux с применением фаззинга системных вызовов, демонстрирует высокую эффективность этого подхода. Метод основан на подаче на вход тестируемой системе большого количества случайных или специально сгенерированных данных и мониторинге аномального поведения, указывающего на наличие уязвимости.

Современные фаззинговые фреймворки для ядер ОС включают syzkaller (для ядра Linux), kAFL, kfuzz и другие. Эти инструменты позволяют автоматизировать процесс поиска уязвимостей и значительно ускоряют их выявление.

Сканеры уязвимостей представляют собой специализированные программные средства для анализа защищённости операционных систем и других компонентов ИТ-инфраструктуры. Они сопоставляют информацию о версиях ПО и установленных обновлениях с актуальными базами данных уязвимостей.

Сканеры можно разделить на несколько групп: сетевые сканеры – анализируют уязвимости сетевых сервисов; сканеры приложений – специализируются на уязвимостях конкретных приложений; агентные сканеры – устанавливаются непосредственно на анализируемую систему и обеспечивают наиболее полный охват.

Современные методы обнаружения эксплуатации уязвимостей выходят за рамки простого сканирования. Например, Oracle Ksplice's Known Exploit Detection не только устраняет уязвимости без перезагрузки системы, но и активно отслеживает попытки эксплуатации уже исправленных уязвимостей, оповещая администраторов о потенциальных атаках. На российском рынке представлены решения для управления уязвимостями, такие как продукт компании Security Vision на платформе Security Vision 5. Этот продукт выполняет сканирование активов, находит уязвимости, а в режиме pentest добавляет новые проверки возможности эксплуатации уязвимостей SNMP, SSL/TLS, SSH, Telnet, RCE, а также дополнительные проверки для web-уязвимостей.

Механизмы защиты от критических уязвимостей.

Аппаратно-программные механизмы защиты.

Современные операционные системы оснащаются всё более совершенными механизмами защиты, направленными на предотвращение эксплуатации уязвимостей или минимизацию их последствий.

Защита памяти – включает механизмы предотвращения выполнения кода в стеке, рандомизацию адресного пространства. Эти механизмы значительно усложняют эксплуатацию уязвимостей, связанных с переполнением буфера.

Мандатный контроль целостности (МКЦ) – российская разработка, реализованная в операционной системе Astra Linux. Использование МКЦ направлено на защиту от вирусов-шифровальщиков и эксплуатации многих типовых уязвимостей ПО, включая атаки с правами суперпользователя root.

Rust в ядре Linux – в 2025 году интеграция языка Rust в ядро Linux достигла значительного прогресса. Rust обеспечивает безопасность памяти на уровне компилятора, предотвращая целые классы уязвимостей, связанные с работой с памятью.

Linux Kernel Runtime Guard (LKRG) – перехватывает попытки эксплуатации уязвимостей во время выполнения, защищая ядро и его критические структуры данных от компрометации. LKRG также выполняет проверки целостности, выявляя попытки обхода механизмов безопасности.

Управление обновлениями безопасности.

Критически важным механизмом защиты является своевременное применение обновлений безопасности. Для отечественных операционных систем, как отмечается в отраслевых источниках, «критические уязвимости, включая уязвимости нулевого дня, стараемся закрывать максимально быстро, иногда в течение суток. Еженедельно выходят обновления, включающие патчи безопасности».

Механизмы защиты от уязвимостей нулевого дня.

Защита от ещё неизвестных уязвимостей (нулевого дня) представляет особую сложность. Помимо описанных выше аппаратно-программных механизмов, эффективными стратегиями являются: принцип наименьших привилегий – минимизация прав, предоставляемых процессам и пользователям; изоляция процессов – использование контейнеризации, sandbox-окружений и виртуализации; мониторинг аномалий – выявление подозрительной активности, которая может указывать на эксплуатацию неизвестной уязвимости.

Анализ современных данных позволяет выделить несколько ключевых тенденций в области уязвимостей операционных систем: рост числа эксплуатируемых уязвимостей, увеличение доли zero-day уязвимостей, направленных на корпоративные системы, рост сложности атак, увеличение числа выявляемых уязвимостей в ядре Linux.

На основе проведённого анализа можно сформулировать следующие практические рекомендации для специалистов по информационной безопасности и системных администраторов [7]:

1. Непрерывный мониторинг угроз. Использование актуальных источников информации об уязвимостях, включая CISA KEV, позволяет оперативно реагировать на наиболее опасные угрозы. Особое внимание следует уделять уязвимостям, для которых уже есть подтверждённые случаи эксплуатации.

2. Приоритезация на основе контекста. Не все уязвимости одинаково опасны для конкретной инфраструктуры. Приоритезация должна учитывать критичность актива, его доступность и наличие работающих эксплойтов. Каталог CISA KEV даёт однозначный сигнал о необходимости немедленного исправления.

3. Автоматизация управления обновлениями. С учётом роста числа выявляемых уязвимостей ручное управление обновлениями становится неэффективным. Необходимо внедрять автоматизированные системы управления патчами с возможностью экстренного исправления критических уязвимостей.

4. Использование механизмов глубинной защиты. Полагаться исключительно на своевременное обновление ОС недостаточно. Необходимо внедрять дополнительные механизмы защиты: контроль целостности, изоляцию процессов, мониторинг аномалий.

5. Регулярный анализ защищённости. Проведение регулярных сканирований уязвимостей, а также периодических пентестов для проверки эффективности существующих мер защиты.

6. Учёт специфики российских ОС. При использовании отечественных операционных систем необходимо учитывать особенности их архитектуры безопасности, включая механизмы мандатного контроля целостности.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Ландшафт угроз для операционных систем продолжает усложняться. Рост числа эксплуатируемых уязвимостей (более чем вдвое в 2025 году) и увеличение доли zero-day уязвимостей, нацеленных на корпоративные системы, требуют пересмотра подходов к управлению уязвимостями.

2. Каждая из основных операционных систем имеет свои характерные уязвимости.

3. Эффективное управление уязвимостями требует комплексного подхода, включающего статический анализ кода, фаззинг, регулярное сканирование и мониторинг попыток эксплуатации. Важную роль играют системы класса VM и SIEM/SOC.

4. Аппаратно-программные механизмы защиты значительно усложняют эксплуатацию уязвимостей, но не устраняют необходимость своевременного исправления.

5. Для российской практики актуально использование отечественных систем управления уязвимостями, а также учёт особенностей защитных механизмов российских ОС.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку методов прогнозирования появления новых уязвимостей, совершенствование автоматизированных средств их выявления и создание эффективных механизмов защиты от ещё неизвестных угроз.

Список литературы:

1. Shannon C.E. Communication Theory of Secrecy Systems // Bell System Technical Journal. – 1949. – Vol. 28, No. 4. – P. 656-715.
2. Menezes A.J., van Oorschot P.C., Vanstone S.A. Handbook of Applied Cryptography. – CRC Press, 1996. – 816 p.
3. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
4. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
5. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
6. Грибунин, В.Г. Стеганографические системы. Цифровые водяные знаки / В.Г. Грибунин, В.Е. Костюков, А.П. Мартынов, Д.Б. Николаев, В.Н. Фомченко. – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2016. - 210 с.

7. Бабанов Н.Ю., Евстифеев А.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Основы защиты информации в современных информационных системах: учебное пособие. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. – 175 с.

КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ И КВАНТОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕЙ

Шавров Е.Д., Вовк Н.Н., Сергеев Д.В.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Современная цифровая инфраструктура в значительной степени опирается на математические алгоритмы шифрования, такие как RSA и ECC, стойкость которых основана на вычислительной сложности решения задач факторизации и дискретного логарифмирования. Однако развитие квантовых вычислений создаёт экзистенциальную угрозу для этих криптосистем. Алгоритм Шора способен решать данные задачи за полиномиальное время, что делает традиционные методы уязвимыми [1].

Квантовая криптография предлагает принципиально иной подход к защите информации. В отличие от классических методов, где безопасность зависит от ограниченных вычислительных ресурсов злоумышленника, квантовая криптография использует фундаментальные законы квантовой физики. Это обеспечивает безопасность, не зависящую от вычислительных мощностей нарушителя [2-6].

Центральной задачей квантовой криптографии является квантовое распределение ключей (Quantum Key Distribution, QKD), которое позволяет двум удалённым сторонам (традиционно называемым Алиса и Боб) создать общий секретный ключ с гарантией, что любая попытка перехвата будет обнаружена. В данном докладе рассматриваются основные принципы, протоколы, технологические достижения и перспективы развития квантовой криптографии.

Безопасность квантовой криптографии базируется на двух фундаментальных принципах квантовой механики:

1. Теорема о запрете клонирования (No-Cloning Theorem): невозможно создать идеальную копию неизвестного квантового состояния. Это означает, что злоумышленник не может просто «скопировать» переданный фотон для последующего изучения.

2. Принцип неопределённости Гейзенберга: измерение квантовой системы неизбежно её возмущает. При попытке перехвата и измерения квантового состояния (например, фотона) это состояние изменяется, что может быть обнаружено легальными пользователями.

Таким образом, квантовая криптография защищает данные не за счёт сложности математических алгоритмов, а благодаря незыблемым законам природы. Попытка перехвата ключа неминуемо нарушает квантовое состояние передаваемых частиц, делая вторжение обнаружимым.

Первым и наиболее широко известным протоколом квантового распределения ключей является протокол BB84, предложенный в 1984 году Чарльзом Беннеттом и Жилем Брассаром.

Протокол использует четыре квантовых состояния двухуровневой системы (кубита), формирующих два сопряжённых базиса:

1. Прямолинейный базис («+»): состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$.

2. Диагональный базис («×»): состояния $|+\rangle$ и $|-\rangle$.

Основные этапы протокола:

1. Алиса случайным образом выбирает базис и отправляет Бобу последовательность фотонов в соответствующих состояниях.

2. Боб для каждого полученного фотона случайным образом выбирает один из базисов и проводит измерение.

3. После передачи всех фотонов Алиса и Боб по открытому каналу связи сообщают друг другу, какие базисы использовали.

4. Они отбрасывают результаты измерений, где базисы не совпали.

5. Оставшиеся биты (согласованные результаты) становятся «сырым ключом».

6. Далее следуют процедуры исправления ошибок и усиления секретности.

Если злоумышленник (Ева) попытается перехватить квантовые состояния, то её измерения будут вносить ошибки в квантовые состояния, передаваемые Бобу. Это увеличит уровень ошибок в сыром ключе, и стороны смогут обнаружить присутствие подслушивающего [7].

В 2026 году создатели протокола BB84 были удостоены премии Тьюринга – высшей награды в области компьютерных наук – что подтвердило фундаментальное значение этой разработки для цифровой безопасности будущего.

Помимо BB84, существует ряд других протоколов QKD, каждый со своими особенностями:

Протокол E91 (Экерта, 1991) – этот протокол, предложенный Артуром Экертом, использует запутанные квантовые состояния для обеспечения безопасности. В E91 одна из сторон генерирует пары запутанных фотонов и отправляет один фотон каждой пары другому участнику. Измерение состояний запутанных частиц позволяет выявить попытки подслушивания.

Протокол B92 (Беннетта, 1992) – B92 представляет собой упрощённую версию BB84, использующую только два квантовых состояния вместо четырёх. Однако он имеет определённые ограничения по дальности и скорости генерации ключа.

Протокол MDI-QKD (Measurement-Device-Independent QKD) – этот протокол устраняет уязвимости, связанные с несовершенством измерительного оборудования, что делает его более устойчивым к атакам на практическую реализацию.

Протоколы QKD классифицируются по двум основным типам: с дискретными переменными (Discrete Variable, DV-QKD) и с непрерывными переменными (Continuous Variable, CV-QKD). Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки с точки зрения дальности передачи, скорости и совместимости с существующей инфраструктурой.

Переход от теоретической безопасности QKD к практическим системам связан с преодолением серьёзных проблем. Теоретические модели предполагают идеальные условия: совершенные однофотонные источники и детекторы с единичной квантовой эффективностью, а также отсутствие потерь в канале связи. Однако в реальных системах безопасность доказывается в рамках теоретических моделей, но практическая реализация далека от идеала [8, 9].

Основные практические проблемы QKD:

1. Потери в оптическом волокне: ограничивают дальность передачи ключа.
2. Несовершенство детекторов: вносят ошибки и создают потенциальные каналы для атак.
3. Шумы и температурные колебания: ухудшают качество передаваемого квантового сигнала.
4. Высокая стоимость оборудования: ограничивает широкое коммерческое внедрение.
5. Необходимость специализированной инфраструктуры: требует выделенных оптических каналов.

Российскими учёными разработан алгоритм машинного обучения, который в режиме реального времени анализирует телеметрию канала связи и динамически подбирает оптимальный режим коррекции ошибок, минимизируя потери данных и сохраняя криптостойкость [10].

Китайская телекоммуникационная компания China Telecom объявила о коммерческом запуске первой в мире распределённой криптографической системы, сочетающей QKD и постквантовую криптографию (PQC). Сеть Hefei Quantum Network протянулась на 1150 км оптоволокна, обслуживая более 500 государственных учреждений и 380 государственных предприятий.

В России, на волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) протяжённостью 143 километра, был установлен мировой рекорд для действующих коммерческих сетей связи. Линия соединила лабораторию в КНИТУ-КАИ с узлом связи «Ростелекома» в Апастово, показав практическую применимость технологии.

В России ведётся активная работа по стандартизации квантовых технологий. Разрабатываются стандарты, определяющие общие требования к безопасности, методологию тестирования и интерфейсы управления. Технический комитет 26 (ТК 26) разрабатывает перспективные постквантовые криптографические алгоритмы, призванные дополнить комплекс стандартов серии ГОСТ Р 34.

На международном уровне в 2025 году Европейский институт стандартов по телекоммуникациям (ETSI) опубликовал стандарт ETSI TS 104 015, определяющий гибридную схему квантово-устойчивого обмена ключами. Ведущие мировые организации, включая NIST, ANSSI (Франция), BSI (Германия) и ENISA (ЕС), координируют усилия по стандартизации QKD и PQC.

Прогнозы развития QKD (таблица).

Период	Ожидаемые события
2026	Первые шаги и национальные планы по внедрению PQC
2028	Запуск российского спутника для космического сегмента квантовой сети
2030	Завершение защиты критической инфраструктуры для высокорисковых сценариев
2035	Полное завершение широкомасштабного перехода на квантово-безопасные коммуникации

Рынок квантовой криптографии демонстрирует значительный рост: его объём увеличится с 1,15 млрд долларов в 2025 году до 1,59 млрд долларов в 2026 году, что соответствует среднегодовому темпу роста (CAGR) в 38%.

Важно понимать различие между QKD и постквантовой криптографией (PQC). QKD использует физические свойства одиночных фотонов для обнаружения перехвата, в то время как PQC заменяет уязвимые математические алгоритмы новыми, стойкими к квантовым атакам. Эти подходы не являются взаимоисключающими. Китайская сеть China Telecom демонстрирует успешную комбинацию QKD и PQC в единой «двухконтурной» системе.

Эксперты сходятся во мнении, что оптимальной стратегией защиты критической инфраструктуры является комбинация обоих методов, обеспечивающая глубокоэшелонированную защиту: PQC для широкого развёртывания на существующем оборудовании и QKD для особо ответственных каналов с наивысшими требованиями к безопасности.

Квантовая криптография и квантовое распределение ключей представляют собой одно из наиболее перспективных направлений развития информационной безопасности. Основываясь на фундаментальных законах квантовой физики, QKD обеспечивает теоретически невзламываемую защиту каналов связи. Современное развитие технологий QKD характеризуется несколькими ключевыми тенденциями: переходом от лабораторных установок к коммерческим системам, интеграцией с существующей инфраструктурой, развитием сетевых архитектур, стандартизацией и сочетанием с постквантовой криптографией [11].

Для России развитие квантовых коммуникаций является стратегическим приоритетом. Отечественные разработки (QRate, СМАРТС-Квантттелеком) и научные исследования (КНИТУ-КАИ, МФТИ, Университет ИТМО) находятся на передовых позициях, что подтверждается мировыми рекордами и успешными пилотными проектами. Дальнейшее развитие технологий QKD должно быть направлено на снижение стоимости оборудования, увеличение дальности передачи ключей и интеграцию квантовых сетей в единую инфраструктуру цифровой экономики.

Список литературы:

1. Katz J., Lindell Y. Introduction to Modern Cryptography. – 3rd ed. – CRC Press, 2020. – 626 p.
2. Shannon C.E. Communication Theory of Secrecy Systems // Bell System Technical Journal. – 1949. – Vol. 28, No. 4. – P. 656-715.
3. Menezes A.J., van Oorschot P.C., Vanstone S.A. Handbook of Applied Cryptography. – CRC Press, 1996. – 816 p.
4. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
5. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
6. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
7. Грибунин, В.Г. Стеганографические системы. Цифровые водяные знаки / В.Г. Грибунин, В.Е. Костюков, А.П. Мартынов, Д.Б. Николаев, В.Н. Фомченко. – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2016. - 210 с.
8. Шишкин Г., Николаев Д. Селекторы цифровых команд. Часть 2 // Компоненты и технологии. 2009. № 8 (97). С.112-116.

9. Don J., Fehr S., Huang Y.-H., Struck P. On the (in)security of the BUFF transform // CWI Amsterdam, 2024. – URL: https://ir.cwi.nl/pub/34395/
10. Шишкин Г., Николаев Д. Селекторы цифровых команд. Часть 1 // Компоненты и технологии. 2009. № 6 (95). С. 96-101.
11. Бабанов Н.Ю., Евстифеев А.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Основы защиты информации в современных информационных системах: учебное пособие. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. – 175 с.

ОБЗОР МЕТОДОВ РЕВЕРСИВНОГО ИНЖИНИРИНГА ПРИЛОЖЕНИЙ

Чернышов С.А., Груздев С.В, Казаков А.А., Евстифеев А.А., Красильников Б.А.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

В современном мире программное обеспечение (ПО) пронизывает все сферы человеческой деятельности, от бытовых приборов и мобильных устройств до критической инфраструктуры и финансовых систем. Однако зачастую исследователи, специалисты по кибербезопасности и инженеры сталкиваются с необходимостью изучить программу, исходный код которой недоступен. Причинами могут быть утеря исходных текстов, проприетарное (закрытое) программное обеспечение или, что особенно актуально в сфере информационной безопасности, противодействие вредоносному ПО [1-3]. В таких ситуациях на помощь приходит реверсивный инжиниринг (reverse engineering) – процесс исследования готового программного продукта с целью понимания его внутреннего устройства, алгоритмов и принципов функционирования [4,5].

Сложность этой задачи обусловлена тем, что исполняемый (бинарный) файл представляет собой низкоуровневый машинный код, лишенный большей части семантической информации, присущей исходному коду (имена переменных, структуры данных, комментарии). Поэтому реверсивный инжиниринг превращается в сложную научно-техническую проблему, решение которой невозможно без привлечения строгого математического аппарата. В настоящем докладе мы проведем анализ основных методов реверсивного инжиниринга, сфокусировавшись на лежащих в их основе математических моделях [6].

Традиционно методы анализа бинарного кода подразделяются на две большие группы: статические и динамические.

Статический анализ исследует программу без ее реального выполнения. Его математической основой является теория графов, формальных языков и абстрактной интерпретации [7].

Первым и важнейшим шагом является дизассемблирование – перевод машинного кода в мнемоники языка ассемблера. На этом этапе ключевую роль играет построение графа потока управления (Control Flow Graph, CFG).

CFG – это ориентированный граф G = (V, E), где:

V – множество базовых блоков (последовательностей инструкций с одним входом и одним выходом);

E – множество дуг, представляющих возможные передачи управления (условные и безусловные переходы, вызовы функций).

CFG является фундаментальной математической моделью, позволяющей анализировать структуру программы: выявлять циклы, ветвления, недостижимый код и границы функций. Дальнейшим развитием этой модели является граф зависимостей (Program Dependence Graph, PDG), который вводит связи по данным и управлению, что позволяет проводить более глубокий анализ, например, для построения «срезов» программы.

Над графовой моделью надстраивается аппарат абстрактной интерпретации. Его суть заключается в выполнении программы над абстрактными, а не конкретными значениями данных. Например, вместо точного значения переменной x может использоваться ее знак ("положительное", "отрицательное", "ноль") или интервал возможных значений. Формально это описывается через решетки и связи Галуа (Galois connections), что позволяет математически строго доказывать свойства программы, например, отсутствие деления на ноль или выходов за границы массива, для всех возможных путей выполнения.

Динамический анализ подразумевает выполнение программы в контролируемой среде (песочнице) с целью наблюдения за ее реальным поведением. Основными инструментами здесь являются отладчики и средства трассировки системных вызовов.

С математической точки зрения, динамический анализ можно рассматривать как исследование дискретной динамической системы S, описываемой уравнением состояний:

$s_{t+1} = f(s_t, i_t)$

где:

s_t – состояние системы (значения регистров процессора, памяти, стека) в момент времени t;

i_t – входное воздействие (ввод пользователя, данные из сети);

f – функция переходов, реализуемая машинным кодом.

Цель динамического анализа – на основе наблюдаемой последовательности состояний ($s_0, s_1, ..., s_n$) и выходных реакций восстановить вид функции f (то есть алгоритм) или ее важные свойства. Такой подход напрямую связывает реверсивный инжиниринг с задачами идентификации динамических систем.

Рост сложности программного обеспечения и развитие методов обфускации (запутывания) кода требуют более мощных аналитических инструментов, основанных на формальных методах.

Одним из наиболее эффективных методов глубокого анализа является символьное выполнение. В отличие от конкретного выполнения, где переменные принимают числовые значения, при символьном выполнении входные данные программы заменяются символьными переменными α, β, γ .

При проходе по каждой ветви программы строится условие пути (path condition, PC) – логическая формула над символьными переменными. Например, после выполнения условного оператора if ($x > 10$) для ветви then будет сгенерировано условие PC = $\alpha > 10$). Выходные значения также выражаются в виде символьных выражений.

В результате задача анализа программы сводится к решению систем логических уравнений. Чтобы определить, возможен ли путь, приводящий к заданной точке программы (например, к уязвимости), достаточно проверить выполнимость условия пути. Для этого используются SMT-решатели (Satisfiability Modulo Theories), которые являются воплощением сложнейших разделов математической логики и теории алгоритмов.

Инструменты, подобные ReSMT, демонстрируют практическую мощь этого подхода, преобразуя обфусцированный ассемблерный код в систему логических утверждений и позволяя автоматически отвечать на сложные вопросы о его функциональности [8, 9].

Другой важный класс методов связан с поиском известных фрагментов кода. Здесь активно используется математический аппарат булевой алгебры и теории графов.

Сигнатурный анализ позволяет сопоставлять неизвестные бинарные последовательности с эталонными сигнатурами (например, функциями стандартных библиотек). Для повышения устойчивости к небольшим изменениям (компиляция с разными флагами оптимизации) применяются эвристические и вероятностные методы, в частности, нечеткое хеширование и вычисление расстояний между графами. Задача сводится к оценке подобия двух объектов – бинарных файлов или графов потока управления.

Для установления точной функциональной эквивалентности между исследуемым фрагментом и эталонной реализацией используются SAT (Boolean Satisfiability) и SMT-решатели. Формулируется задача: доказать, что для всех возможных входных данных выходы исследуемой и эталонной схемы (или фрагмента кода) совпадают. Это прямой выход в область формальной верификации программ.

Математические модели не только служат инструментом анализа, но и сами являются продуктом реверсивного инжиниринга. Восстановленная программа должна быть представлена в виде, пригодном для дальнейшего изучения.

Одним из таких представлений является математическая модель управляющего графа (Control Flow Graph). Управляющий граф можно рассматривать как конечный автомат, где узлы – это состояния программы, а переходы – это инструкции или базовые блоки. Такой подход позволяет применять к анализу программы богатый инструментарий теории автоматов и формальных языков.

Другим примером являются модели, основанные на генетических алгоритмах. В рамках концепции "генетической деэволюции представлений" процесс обратного восстановления исходного кода из бинарного рассматривается как решение оптимизационной задачи.

Алгоритм итеративно генерирует множество "псевдо-предыдущих" представлений кода, оценивает их близость к исследуемому бинарному файлу (с помощью метрик и фитнес-функции) и, используя операторы скрещивания и мутации, находит наиболее вероятное исходное представление. Это позволяет эффективно бороться с обфускацией и восстанавливать алгоритмы даже при значительной потере информации.

Традиционные методы требуют значительных временных затрат и высокой квалификации аналитика. Ответом на вызовы постоянно растущего объема и сложности кода становится применение методов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) [10-12].

Современные исследования активно развивают следующие направления:

- автоматическая декомпиляция и восстановление функций: использование больших языковых моделей (LLM) для предсказания имен переменных и структур данных, а также для генерации человеко-читаемого псевдокода из ассемблера;
- классификация и кластеризация кода: модели МО (нейронные сети, графовые нейронные сети) обучаются на огромных объемах бинарного кода для автоматического выявления вредоносного ПО, поиска похожих функций или обнаружения уязвимых паттернов;
- автоматизация поиска уязвимостей: сочетание символьного выполнения с методами МО позволяет ускорить и автоматизировать процесс фаззинга – тестирования программы случайными данными с целью вызвать ее сбой.

Таким образом, ИИ и формальные методы, объединяясь, создают новый класс инструментов для автоматизированного реверсивного инжиниринга, способных справляться со сложным обфусцированным кодом, который ранее требовал исключительно ручного труда эксперта.

Заключение

Реверсивный инжиниринг приложений – это не просто набор хакерских техник, а глубокая научная дисциплина, находящаяся на стыке информатики, кибербезопасности и математики. В основе всех современных методов – от базового построения графов потока управления до сложнейшего символьного выполнения и использования SMT-решателей – лежит строгий математический аппарат. Теория графов, формальные языки, математическая логика и теория оптимизации являются тем фундаментом, на котором строятся инструменты для анализа бинарного кода.

В будущем мы увидим еще более тесную интеграцию методов формальной верификации и искусственного интеллекта, что позволит автоматизировать решение задач, которые сегодня находятся на пределе человеческих возможностей. Развитие этих методов имеет критическое значение для обеспечения кибербезопасности в эпоху цифровой трансформации, когда умение понимать и контролировать программный код является ключом к защите национальных интересов и технологическому лидерству.

Список литературы:

1. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
2. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
3. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
4. Грибунин, В.Г. Стеганографические системы. Цифровые водяные знаки / В.Г. Грибунин, В.Е. Костюков, А.П. Мартынов, Д.Б. Николаев, В.Н. Фомченко. - Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2016. - 210 с.
5. Шишкин Г., Николаев Д. Селекторы цифровых команд. Часть 2 // Компоненты и технологии. 2009. № 8 (97). С.112-116.
6. Шишкин Г., Николаев Д. Селекторы цифровых команд. Часть 1 // Компоненты и технологии. 2009. № 6 (95). С. 96-101.
7. Шишкин Г., Николаев Д. Селекторы цифровых команд. Часть 4 // Компоненты и технологии. 2009. № 11 (100). С.102-106.

8. Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Соколов С.Ю. Концептуальные основы построения систем обеспечения взаимной аутентификации объектов - Известия института инженерной физики, 2008. № 4(10). С.6-9.
9. Казаков А.А., Евстифеев А.А., Николаев Д.Б. Разработка предложений по оценке защищенности информации, обрабатываемой разнородными техническими системами. Сборник материалов XVII Всероссийской Молодежной научно-инновационной школы: математика и математическое моделирование. 2023. С. 33-34.
10. Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Криптография и электроника / Под ред. А.И. Астайкина. 2-е издание, переработанное и дополненное. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2020. - 552 с.
11. Волков К.О., Мартынов А.П., Марунин М.В., Николаев Д.Б. Аналитические исследования характеристик информационной составляющей автоматизированных систем управления и контроля: Учеб.-метод. Пособие. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2017. – 197 с.
12. Булгакова, А. О. Анализ современных угроз информационной безопасности технических систем и технологических решений / А. О. Булгакова, Д. Б. Николаев, А. Е. Беликов // Математика и математическое моделирование: сборник материалов X всероссийской молодежной научно-инновационной школы, Саров, 12–14 апреля 2016 года. – Саров: Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 5-6.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ С ПАРАМЕТРАМИ, ПРИБЛИЖАЮЩИМИСЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

Чернышов Д.В., Марунин М.В.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Понятие теоретической (абсолютной, совершенной) стойкости было введено Клодом Шенноном в его основополагающей работе "Теория связи в секретных системах" (1949). Криптосистема называется совершенно стойкой, если перехватчик, имеющий неограниченные вычислительные ресурсы, не может получить никакой информации об открытом тексте из перехваченного шифротекста, кроме, возможно, его длины. Математически это условие выражается равенством: $P(P = p|C = c) = P(P = p)$ для всех возможных открытых текстов p и шифротекстов c.

Единственной практически реализуемой совершенно стойкой системой является одноразовый блокнот (шифр Вернама), требующий, чтобы ключ был истинно случайным, имел длину, равную длине сообщения, и никогда не использовался повторно [1]. Эти требования делают одноразовый блокнот неприменимым для большинства практических задач.

Поэтому на практике используются криптографические системы, стойкость которых основана на вычислительных предположениях – они считаются стойкими, если любой вероятностный полиномиальный алгоритм имеет пренебрежимо малую вероятность успеха при решении некоторой математической задачи. Однако между практическими схемами и теоретическим идеалом существует разрыв: параметры реальных криптопреобразований (энтропия выходных последовательностей, корреляционные свойства, равномерность распределения) могут лишь приближаться к теоретически достижимым значениям [2].

Цель настоящего доклада – исследовать современные подходы к разработке криптографических преобразований, параметры которых максимально приближаются к теоретическим пределам, рассмотреть достигнутые результаты и определить перспективные направления исследований.

Для оценки того, насколько криптографическое преобразование близко к теоретически идеальному, используются следующие количественные метрики [3]:

- энтропия Шеннона – мера неопределённости (случайности) выходной последовательности. Для идеального случайного равномерного распределения на множестве из n символов энтропия достигает максимального значения $\log_2 n$ бит на символ;
- корреляция – мера линейной зависимости между входными и выходными данными, а также между соседними элементами выходной последовательности. В идеальном шифротексте корреляция должна стремиться к нулю;
- лавинный эффект – изменение одного бита входного сообщения или ключа должно приводить к изменению примерно половины битов выходного шифротекста;

- результаты статистических тестов – стандартизированные наборы тестов (NIST, Diehard, TestU01) оценивают, насколько последовательность отличается от идеально случайной;

- теоретически достижимые значения этих параметров известны, и задача разработчика – максимально приблизиться к ним при сохранении практической реализуемости преобразования.

Анализ современных исследований позволяет выделить несколько перспективных направлений создания криптографических преобразований с параметрами, близкими к теоретическим.

Одним из наиболее эффективных подходов является сочетание алгебраических структур с хаотическими отображениями. Хаотические системы обладают свойствами, крайне желательными для криптографии: чувствительностью к начальным условиям, эргодичностью, псевдослучайностью траекторий.

В работе [4] предложен метод, комбинирующий преобразование Харрата-Томы с операторами сравнения по модулю. Преобразование Харрата-Томы обеспечивает эффективное перемешивание битов, а модулярные операторы вносят нелинейность, необходимую для защиты от криптоанализа.

Ключевые особенности подхода:

- использование прямого и обратного преобразования;

- встраивание достаточной сложности для противостояния современным атакам;

- сохранение баланса между вычислительной эффективностью и безопасностью.

Другой пример – схема RNA-TransCrypt, разработанная Khan и соавторами (2025) для шифрования изображений [5]. Схема объединяет био-криптографические свойства РНК-кодирования с нелинейностью и непредсказуемостью хаотических систем.

Три ключевых нововведения:

1. Двухосновной метод РНК-кодирования, преобразующий изображение в последовательность, подобную РНК-цепочке.

2. Техника трансформативной подстановки, модифицирующая значения S-блоков перед заменой пикселей.

3. Специализированные математические операции, зависящие от ключа на основе хаотических отображений (фрактальная карта Де Йонга и осциллятор Ван дер Поля).

Принципиально иной подход заключается в построении криптографических схем, стойкость которых строго редуцируется к сложности решения хорошо изученной математической задачи. Это позволяет давать доказательные гарантии безопасности в рамках определённых вычислительных моделей.

В работе [6] предложен метод построения симметричных шифров, подобных NTRU, безопасность которых основана на сложности задачи Decision-Ring-LWE (обучение с ошибками над кольцами). Это важный результат, поскольку большинство NTRU-подобных схем являются асимметричными, а попытки создания симметричных аналогов (NTRUCipher) ранее оказывались уязвимы к атакам на основе выбранного открытого текста.

Разработанный метод позволяет:

- обеспечить стойкость против атак с выбранным открытым текстом (CPA-security);

- сохранить ту же длину ключа, что и у NTRUCipher;

- достичь времени шифрования/дешифрования, сравнимого с финалистом конкурса NTRU Prime.

Ключевое преимущество – безопасность схемы основывается только на сложности одной математической задачи, что приближает её к идеалу доказательной стойкости.

Важным направлением является создание новых примитивов, занимающих промежуточное положение между существующими и позволяющих достичь лучшего баланса между безопасностью и эффективностью.

Существует понятие rugged pseudorandom permutation (RPRP) – новый класс стойкости, расположенный между псевдослучайными перестановками (PRP) и сильными псевдослучайными перестановками (SPRP) [7]. Ключевая идея: RPRP слабее SPRP, но допускает более эффективную реализацию – для построения требуется только два слоя обработки данных вместо трёх.

Преимущества подхода:

- возможность построения более компактных шифротекстов в схемах аутентифицированного шифрования;

- эффективная реализация в контексте защищённых каналов QUIC и DTLS;
- новые возможности для создания каналов, устойчивых к нарушению порядка доставки.

Этот результат важен для понимания того, что приближение к теоретической стойкости не обязательно означает выбор максимально сильного примитива – иногда оптимальным является выбор примитива с промежуточными свойствами, обеспечивающего требуемый уровень безопасности при лучшей производительности.

Для оценки качества шифрования критически важна энтропия выходной последовательности – мера её непредсказуемости. Максимально достижимая энтропия для 8-битного символа составляет 8 бит.

В схеме RNA-TransCrypt достигнуто значение энтропии 7,997 бит [5]. Это чрезвычайно близко к теоретическому максимуму (отклонение менее 0,04%). Такой результат означает, что выходная последовательность практически неотличима от идеально случайной с точки зрения статистических свойств первого порядка.

Преобразование Харрата-Томы также демонстрирует значения энтропии, близкие к теоретическому максимуму, что подтверждено соответствующими измерениями [4].

Корреляция между соседними элементами шифротекста – важный показатель, поскольку высокие значения корреляции могут быть использованы для атак. В идеальном шифре корреляция должна стремиться к нулю.

В схеме RNA-TransCrypt достигнуто значение корреляции 0,0006 [5]. Это значение близко к нулю и свидетельствует о практически полном отсутствии статистических зависимостей в выходной последовательности.

Набор статистических тестов NIST (National Institute of Standards and Technology) является общепризнанным стандартом для оценки качества генераторов случайных и псевдослучайных последовательностей. Успешное прохождение всех тестов – необходимое (хотя и недостаточное) условие для признания криптографического преобразования качественным.

Исследование преобразования Харрата-Томы показало, что модель проходит все тесты NIST, включая частотный тест, тест на частоту внутри блока, тест на приблизительную энтропию и другие [4]. Это подтверждает высокое качество генерируемых последовательностей и их близость к идеально случайным.

В работе также отмечено, что частоты символов в шифротексте сильно маскируются, и корреляция между открытым текстом и шифротекстом практически отсутствует [4].

В таблице 1 представлено сравнение параметров рассмотренных схем с теоретическим идеалом.

Таблица 1. Сравнение параметров криптографических преобразований

Параметр	Теоретический идеал	Kharrat-Toma Transform [4]	RNA-TransCrypt [5]	Традиционные блочные шифры
Энтропия (8-бит)	8,0	близко к макс.	7,997	≈ 7,99
Корреляция	0,0	не указано	0,0006	0,001–0,01
NIST-тесты	все пройдены	все пройдены	–	все пройдены

Как видно из таблицы, современные разработки позволяют вплотную приблизиться к теоретическим пределам по энтропии и корреляции, достигая значений, которые ранее считались практически недостижимыми для вычислимых преобразований.

Несмотря на впечатляющие статистические характеристики, важно понимать ограничения существующих подходов.

Успешное прохождение статистических тестов и высокая энтропия являются необходимыми, но недостаточными условиями криптографической стойкости. Существуют примеры генераторов, отлично проходящих все статистические тесты, но уязвимых для криптоаналитических атак, учитывающих внутреннюю структуру преобразования.

Для большинства практических схем, включая RNA-TransCrypt и преобразование Харрата-Томы, отсутствуют строгие доказательства стойкости в рамках общепринятых криптографических моделей. Их безопасность подтверждается лишь экспериментально, что оставляет возможность существования неизвестных атак.

Исследование BUFF-преобразования, представленное на CRYPTO 2024, показало, что даже для схем, прошедших предварительный криптоанализ, могут существовать

фундаментальные ограничения [8, 9]. Авторы продемонстрировали, что BUFF-преобразование не достигает заявленного свойства стойкости в стандартной модели, а ранее опубликованные доказательства содержали ошибки.

Это важный методологический урок: эмпирические свидетельства безопасности должны подкрепляться строгими математическими доказательствами в рамках чётко определённых моделей угроз.

Приближение к теоретическим пределам часто достигается ценой вычислительных затрат. Для ограниченных устройств (IoT, смарт-карты) может требоваться компромисс между близостью к идеалу и скоростью работы. В этом контексте подход с неточными примитивами предлагает интересную альтернативу: выбор примитива с гарантированно достаточными, но не максимальными свойствами для достижения лучшей производительности [7, 10, 11].

На основе проведённого анализа можно выделить следующие направления для дальнейших исследований:

- разработка доказательно стойких конструкций с хорошими статистическими свойствами: необходимо объединение двух подходов: использование хорошо изученных математических задач (LWE, проблемы на решётках) для доказательной стойкости и применение хаотических и алгебраических преобразований для достижения статистических характеристик, близких к идеальным;
- формальная верификация криптографических свойств: развитие методов автоматического доказательства криптографических свойств, включая верификацию в рамках квантовых моделей угроз. Как показано в работе Don и соавторов [8], корректное определение свойств в различных моделях (стандартной, ROM, QROM) критически важно;
- адаптация квантово-устойчивых алгоритмов: переход к постквантовой криптографии требует пересмотра критериев близости к теоретической стойкости с учётом возможностей квантовых алгоритмов. Разработка симметричных схем на основе решёток [6] – важный шаг в этом направлении;
- создание гибридных схем с адаптивными параметрами: возможность динамического выбора параметров преобразования в зависимости от требований к безопасности и доступных вычислительных ресурсов, включая использование неточных примитивов [7];
- российские разработки: актуальной задачей является создание отечественных криптографических преобразований с параметрами, приближающимися к теоретической стойкости, на основе оригинальных математических подходов и с учётом требований импортозамещения.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Современные криптографические преобразования способны достигать параметров, чрезвычайно близких к теоретическим пределам: энтропия 7,997 бит (при максимуме 8 бит), корреляция 0,0006, успешное прохождение всех тестов NIST [4, 5].
2. Основные подходы к приближению к идеалу включают: комбинирование алгебраических и хаотических преобразований, редукцию к теоретико-сложностным задачам, разработку новых примитивов с промежуточными свойствами.
3. Достижение хороших статистических свойств является необходимым, но недостаточным условием криптографической стойкости. Необходимы строгие доказательства безопасности в рамках общепринятых моделей, что подтверждается анализом BUFF-преобразования [8, 9].
4. Перспективные направления включают разработку доказательно стойких конструкций, формальную верификацию, адаптацию к постквантовым угрозам и создание гибридных адаптивных схем.
5. Практическая значимость таких исследований заключается в возможности создания криптографических систем, максимально приближающихся к теоретическому идеалу совершенной секретности при сохранении приемлемой вычислительной эффективности для практических приложений.

Предложенный в докладе подход в виде выбора примитива с промежуточными свойствами, обеспечивающего требуемый уровень безопасности при лучшей производительности, обеспечивает защиту конфиденциальных данных в современных цифровых системах и повышенную устойчивость к новым криптографическим атакам. Дальнейшее развитие этой области будет определяться прогрессом в понимании фундаментальных ограничений криптографических преобразований и разработкой новых математических методов, позволяющих эти ограничения преодолевать или обходить.

Список литературы:
1. Shannon C.E. Communication Theory of Secrecy Systems // Bell System Technical Journal. – 1949. – Vol. 28, No. 4. – P. 656-715.
2. Грибунин В.Г., Костюков В.Е., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Стеганографические системы. Критерии и методическое обеспечение. Учебно-методическое пособие. Грибунин В.Г (ред.). Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ"; 2016. 324 с.
3. Грибунин, В.Г. Стеганографические системы. Цифровые водяные знаки / В.Г. Грибунин, В.Е. Костюков, А.П. Мартынов, Д.Б. Николаев, В.Н. Фомченко. - Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2016. - 210 с.
4. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
5. Khan M.S., Ahmad J., Al-Dubai A., Ghaleb B., Pitropakis N., Buchanan W.J. RNA-TransCrypt: Image encryption using chaotic RNA encoding, novel transformative substitution, and tailored cryptographic operations // Cybersecurity, Cybercrimes, and Smart Emerging Technologies / Ed. by A.A. Abd El-Latif et al. – Taylor and Francis, 2025. – DOI: 10.1201/9781003614197.
6. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
7. Degabriele J.P., Karadžić V. Overloading the nonce: rugged PRPs, nonce-set AEAD, and order-resilient channels // Advances in Cryptology – CRYPTO 2022. – Lecture Notes in Computer Science, Vol. 13510. – Springer, 2022. – P. 264-295. – DOI: 10.1007/978-3-031-15985-5_8.
8. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
9. Don J., Fehr S., Huang Y.-H., Struck P. On the (in)security of the BUFF transform // CWI Amsterdam, 2024. – URL: https://ir.cwi.nl/pub/34395/
10. Degabriele J.P., Karadžić V. Rugged Pseudorandom Permutations and Their Applications // Presentation at the Third NIST Workshop on Block Cipher Modes of Operation. – NIST, October 3, 2023.
11. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.

ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫЕ МОДЕЛИ, АНАЛИЗЫ РИСКОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ В СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ

Солодилов В.В.[1], Николаева И.А.[2]
[1]Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров
[2]ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Современные информационно-технические системы характеризуются высокой сложностью, распределенностью и подверженностью широкому спектру киберугроз. В этих условиях перед специалистами по информационной безопасности встают две взаимосвязанные задачи: во-первых, количественная оценка рисков, связанных с потенциальными атаками, а во-вторых, оптимальное распределение ограниченных ресурсов для нейтрализации выявленных угроз. Традиционные подходы к решению этих задач, основанные на экспертных оценках и статических моделях, часто не учитывают адаптивное поведение злоумышленника и не позволяют находить оптимальные стратегии защиты [1-5].

Теория игр предлагает естественный математический аппарат для моделирования конфликтного взаимодействия между атакующим и защитником. Как отмечается в современной литературе, «теория игр изучает проблему оптимального принятия решений в условиях конфликтного противоборства» и является «одной из фундаментальных теорий киберпространственной безопасности, способной обеспечить теоретическую основу для решения проблемы принятия решений в области сетевой обороны». Важно подчеркнуть, что в отличие от стандартного определения безопасности, которое часто трактуется как отсутствие угроз, теоретико-игровой подход предлагает иную парадигму: «безопасность – это не отсутствие угроз, а ситуация, когда атака на систему становится более затратной, чем отказ от

неё». Такой взгляд позволяет создавать не пассивные, а активные системы защиты, основанные на принципах стимулирования и сдерживания.

В данном докладе рассматриваются основные классы теоретико-игровых моделей, применяемых для анализа рисков и распределения ресурсов в системах защиты информации, анализируются их возможности и ограничения, а также приводятся примеры практического применения. Современные исследования в области теоретико-игрового моделирования информационной безопасности можно классифицировать по нескольким ключевым признакам: типу взаимодействия между игроками, полноте информации и временному горизонту.

Некооперативные игры: модели «защитник-атакующий».

Наиболее распространённым классом моделей являются некооперативные игры с двумя игроками – защитником (defender) и атакующим (attacker). В таких играх каждый игрок стремится максимизировать свою полезность, которая в контексте информационной безопасности может выражаться в снижении ожидаемого ущерба для защитника и максимизации наносимого ущерба для атакующего.

По типу ходов выделяют одновременные (simultaneous) и последовательные (sequential) игры. В одновременных играх стороны принимают решения, не зная о действиях друг друга, что характерно для сценариев, где защитник не осведомлён о готовящейся атаке. В последовательных же играх одна сторона (обычно защитник) делает первый ход, а другая реагирует на него, что позволяет моделировать стратегии упреждающей защиты.

Важным параметром является полнота информации. В играх с полной информацией каждый игрок знает функции полезности и возможные стратегии оппонента. Однако в реальных условиях атакующий часто обладает информационным преимуществом, что приводит к необходимости моделирования игр с неполной или несовершенной информацией [6].

Игры Штакельберга иерархического взаимодействия.

Особое место в анализе безопасности занимают игры Штакельберга (Stackelberg games), в которых один из игроков (лидер) делает ход первым, а второй (последователь) наблюдает этот ход и реагирует на него оптимальным образом. В контексте информационной безопасности защитник выступает в роли лидера, который выбирает стратегию защиты (например, распределение ресурсов по узлам сети), а атакующий затем выбирает цель для атаки, наблюдая за действиями защитника.

Согласно исследованию, посвящённому системам безопасности на основе Stackelberg-моделей, «в таких играх защитник (лидер) выбирает детерминированную или рандомизированную стратегию защиты, а атакующий (последователь) наблюдает эту стратегию и выбирает цель для атаки, максимизирующую свою полезность». Игры Штакельберга особенно эффективны для моделирования ситуаций, где защитник может продемонстрировать свою стратегию – например, через видимые меры безопасности, такие как патрулирование или установка систем обнаружения вторжений [7-9].

Исследования показывают, что игры Штакельберга позволяют «определить стратегию защиты на основе равновесия по Нэшу и равновесия Штакельберга как в одновременном, так и в последовательном режимах». При этом важное значение имеет информация, доступная игрокам: в режиме последовательных ходов «защитник знает о входе атакующих на рынок и может реализовать лучшую стратегию», что существенно повышает эффективность защиты.

Кооперативные игры и механизмы стимулирования.

Кооперативные игры и теория общественных благ (public goods) находят применение в задачах межорганизационного взаимодействия в области информационной безопасности. Как отмечается в работе по кибербезопасности инвестиционных игр, «учитывая взаимозависимый характер кибербезопасности, совместные инвестиционные стратегии позволяют организациям объединять ресурсы и повышать коллективную устойчивость». Модель общественных благ «объединяет игру в общественное благо с взаимодействием защитник-атакующий», позволяя исследовать кооперативные инвестиции в кибербезопасность при различных уровнях риска атак.

Важным направлением является также теория механизмов, которая позволяет проектировать системы стимулов для достижения социально оптимальных результатов в условиях, когда участники могут вести себя некооперативно. Из-за природы взаимозависимых игр безопасности ни один надёжный налоговый механизм не может стимулировать социально оптимальный профиль инвестиций при сохранении слабого сбалансированного бюджета. При этом учёт поведенческих факторов (поведенческих искажений вероятности) приводит к тому,

что «механизмы обеспечивают большее снижение социальных затрат для поведенческих лиц, принимающих решения, по сравнению с рациональными».

Эволюционные и динамические игры.

В условиях постоянно меняющегося ландшафта угроз статические модели оказываются недостаточными. Эволюционные и динамические игры позволяют моделировать долгосрочную адаптацию стратегий атакующих и защитников с течением времени. Эти подходы особенно актуальны для анализа долгосрочной эволюции киберугроз, где злоумышленники постоянно адаптируют свои методы, а защитники – свои меры противодействия.

Объединение методов операционных исследований с теорией игр позволяет создавать «адаптивные фреймворки для противодействия сложным киберугрозам», включая синтез игр Штакельберга (моделирующих иерархическое взаимодействие), эволюционных игр (учитывающих долгосрочную эволюцию противоборства) и сигнальных игр (рассматривающих обман и дезинформацию).

Распределение ограниченных ресурсов является одной из центральных задач в управлении информационной безопасностью. Теоретико-игровой подход позволяет формализовать эту задачу и находить оптимальные стратегии [8].

Задача распределения ресурсов в системах обнаружения вторжений (IDS) естественно формулируется в терминах теории игр, где атакующий и IDS выступают в роли противоборствующих сторон. Как отмечается в исследовании по распределению ресурсов IDS, «несколько систем обнаружения вторжений могут совместно использовать свои детекционные ресурсы для повышения общей эффективности сетевой безопасности, однако распределение этих ресурсов часто неоптимально». Теория игр позволяет «эффективно моделировать процесс противодействия между атакой и IDS, одновременно получая оптимальные стратегии распределения ресурсов».

Важным направлением является применение теории кооперативных игр для анализа вклада различных сигнатурных баз в общую эффективность обнаружения. Концепции индексов силы – такие как значение Шепли (Shapley value) и индекс Банцафа-Коулмена – позволяют количественно оценить «влияние или вклад библиотек в IDS по отношению к заданным графам атак» [9].

Инвестиции в информационную безопасность представляют собой классическую задачу распределения ресурсов на макроуровне. Исследования показывают, что «оптимальный уровень инвестиций в безопасность для взаимосвязанной фирмы при целенаправленных атаках отличается от такового при оппортунистических атаках», и, что важно, «не все риски информационной безопасности стоят того, чтобы с ними бороться».

Дифференциальные игры применяются для анализа временной динамики инвестиций. Как показано в одном из исследований, «на основе дифференциальных игр и ограничений политики анализируется оптимальный уровень инвестиций в кибербезопасность и обмена информацией в двух сценариях: с ограничениями политики и без них». Такой подход позволяет учитывать, что решения об инвестициях в защиту влияют не только на текущее состояние системы, но и на её устойчивость в будущем.

Важным аспектом моделей распределения ресурсов является учёт отношения лица, принимающего решения, к риску. Исследования показывают, что «организационная склонность к риску влияет не только на собственную стратегию, но и на стратегию оппонента». Более того, «организации с неприятием риска не всегда конфигурируют большее количество IDS, чем организации с нейтральным отношением к риску» – этот контринтуитивный результат демонстрирует сложность зависимости между психологическими характеристиками и стратегиями безопасности [10-12].

Современные информационные системы являются глубоко взаимозависимыми: безопасность одного узла или организации зависит от безопасности других. Это порождает классическую проблему «безбилетника» (free-rider problem), когда каждый участник склонен недоинвестировать в общую безопасность, надеясь на вклад других.

Теория игр позволяет анализировать эту проблему и разрабатывать механизмы для её преодоления. В работе, посвящённой распределению ресурсов для обнаружения и перехвата вторжений, рассматривается «задача злоумышленника, пытающегося перемещаться по территории защитника, где защитник размещает и использует различные наборы ресурсов для снижения вероятности успешного вторжения».

Несмотря на значительный прогресс в развитии теоретико-игровых моделей кибербезопасности, существует ряд фундаментальных методологических проблем, которые ограничивают их практическую применимость.

Систематический обзор (SoK) состояния исследований в области теоретико-игровой кибербезопасности выявил несколько ключевых проблем. Во-первых, теория игр была разработана для экономических систем, где «игроки могут быть эгоистичными, но не злонамеренными», что создаёт фундаментальное ограничение при моделировании действий киберпреступников, которые могут руководствоваться не только рациональной выгодой, но и иными мотивами. Во-вторых, в рамках систематизации были «выявлены технологические разрывы, которые должны быть устранены, чтобы сделать теоретико-игровые модели кибербезопасности действительно полезными». К таким разрывам относятся проблемы масштабируемости, неполноты информации, а также необходимость интеграции с реальными системами обнаружения и реагирования [13].

Одним из наиболее перспективных направлений преодоления этих ограничений является интеграция теоретико-игрового моделирования с методами машинного обучения. Как отмечается в одном из исследований, «сочетание теории игр Штакельберга с глубоким обучением с подкреплением (Deep Reinforcement Learning) позволяет обеспечить гибкую и адаптивную защиту». Цель таких гибридных фреймворков – «способствовать проактивным решениям по защите, которые могут предвидеть и реагировать на атаки со стратегической точностью».

Особый интерес представляет применение многоагентного обучения с подкреплением для моделирования динамической обстановки. Одно из исследований демонстрирует, как «всеведущий злоумышленник может значительно превзойти наивного защитника», что «подчёркивает критическую уязвимость, вносимую динамикой обучения, и эффективность предлагаемой стратегии». Этот результат показывает, что при внедрении обучающихся систем в процессы принятия решений по безопасности необходимо учитывать возможность адаптации злоумышленника к стратегии защитника.

Традиционные теоретико-игровые модели предполагают полную рациональность игроков. Однако в реальных условиях лица, принимающие решения, подвержены когнитивным искажениям и имеют ограниченные вычислительные возможности. Исследования показывают, что «более высокие поведенческие искажения заставляют защитников платить больше налогов» в рамках налоговых механизмов стимулирования, и что «механизмы обеспечивают большее снижение социальных затрат для поведенческих лиц, принимающих решения, по сравнению с рациональными» [14].

Другим направлением учёта человеческого фактора является моделирование игр с ограниченной рациональностью и ограниченной информацией. В одном из исследований предлагается «подход многоагентной сетевой защиты на основе совместного игрового моделирования», который «направлен на повышение эффективности и устойчивости принятия решений по защите в средах, характеризующихся неполной информацией». Такой подход приближает теоретические модели к реальным условиям функционирования систем информационной безопасности.

Несмотря на сохраняющиеся методологические вызовы, теоретико-игровые модели находят всё более широкое практическое применение.

Современные исследования показывают, что объединение теории игр с методами операционных исследований позволяет достичь впечатляющих практических результатов. В одном из недавних исследований эмпирические результаты показали «сокращение на 65,7% числа нарушений, вызванных сложными постоянными угрозами (APT), и возврат инвестиций (ROI) в размере 3,41 для снижения ущерба от программ-вымогателей», что превосходит традиционные подходы. Кроме того, предложенный подход «достигает линейной масштабируемости (O(n)) и адаптируется к гетерогенным средам, включая сценарии с высоким уровнем шума (30% случаев)», что особенно важно для практического применения. Тестирование проводилось «на основе реальных показателей стоимости (CostTime, CostMoney, CostEnergy), полученных из 500 симуляций атак», что подтверждает практическую значимость результатов. Приложения демонстрируются «в чувствительных ко времени секторах, таких как здравоохранение и промышленные системы управления (SCADA), где быстрая экономически эффективная реакция имеет решающее значение».

Теоретико-игровые подходы позволяют перейти от реактивного управления безопасностью к проактивному, основанному на прогнозировании поведения злоумышленника.

Благодаря стратегическому моделированию становится возможным «создавать эффективные стратегии кибербезопасности в условиях взаимозависимой безопасности», учитывая факторы, влияющие на уровень инвестиций, «и то, как восприятие риска и структура сети вместе влияют на стратегический выбор».

Важным практическим приложением является количественная оценка эффективности распределения ресурсов. В рамках теоретико-игрового анализа можно определить, какие конфигурации системы защиты являются оптимальными при заданных бюджетных ограничениях, и оценить, насколько существующая конфигурация близка к оптимальной. «В соответствии с полученными игровыми математическими моделями, можно подчеркнуть важность сетевой ценности клиентов через введение новых переменных в моделирование и выполнение равновесий теории игр». Таким образом, практическое применение теоретико-игровых моделей требует учёта не только технических, но и экономических аспектов.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Теория игр предоставляет мощный математический аппарат для моделирования конфликтного взаимодействия между атакующим и защитником в информационных системах, позволяя перейти от статических оценок рисков к динамическим стратегическим моделям.

2. Основные классы моделей – некооперативные игры «защитник-атакующий», игры Штакельберга, кооперативные игры и эволюционные игры – охватывают широкий спектр задач анализа рисков и распределения ресурсов, от конфигурации IDS до инвестиционной политики на уровне организации.

3. Ключевыми методологическими вызовами остаются фундаментальные ограничения, связанные с экономическими корнями теории игр (игроки скорее эгоистичны, чем злонамеренны), а также проблемы масштабируемости и учёта неполной информации.

4. Наиболее перспективным направлением является интеграция теоретико-игрового моделирования с методами машинного обучения (в частности, глубоким обучением с подкреплением), что позволяет создавать адаптивные системы защиты, способные обучаться в динамической среде.

5. Практические результаты, включая значительное снижение числа нарушений безопасности и положительный возврат инвестиций при применении гибридных фреймворков, демонстрируют потенциал теоретико-игрового подхода для реальных систем информационной безопасности.

6. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методов, учитывающих ограниченную рациональность лиц, принимающих решения, интеграцию с системами мониторинга в реальном времени и адаптацию моделей к специфике российских систем информационной безопасности.

Таким образом, теоретико-игровые модели представляют собой не только академический интерес, но и практически значимый инструмент для повышения эффективности систем защиты информации в условиях роста сложности и адаптивности киберугроз. Переход от реактивной к стратегической парадигме безопасности, основанной на принципах теории игр, является одним из ключевых направлений развития современных систем информационной безопасности.

Список литературы:

1. Подгруппы симметрических групп подстановок ряда факториальных множеств / А.П. Мартынов, И.А. Мартынова, Д.Б. Николаев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 1. – С. 53-62.
2. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
3. Грибунин В.Г., Костюков В.Е., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Стеганографические системы. Критерии и методическое обеспечение. Учебно-методическое пособие. Грибунин В.Г (ред.). Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ"; 2016. 324с.
4. Грибунин, В.Г. Стеганографические системы. Цифровые водяные знаки / В.Г. Грибунин, В.Е. Костюков, А.П. Мартынов, Д.Б. Николаев, В.Н. Фомченко. - Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2016. - 210 с.
5. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.

6. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
7. Основы защиты информации от утечки по техническим каналам / А.А. Евстифеев, В.И. Ерошев, А.П. Мартынов [и др.]. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – 267 с.
8. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
9. Казаков А.А., Евстифеев А.А., Николаев Д.Б. Разработка предложений по оценке защищенности информации, обрабатываемой разнородными техническими системами. Сборник материалов XVII Всероссийской Молодежной научно-инновационной школы: математика и математическое моделирование. 2023. С. 33-34.
10. Концепция информационного взаимодействия участников процесса разработки наукоемкой продукции / И. А. Борисенков, М. Н. Дороненков, Д. Б. Николаев [и др.] // Информатизация образования-2014: Материалы Международной научно-практической конференции, Волгоград, 23–26 апреля 2014 года / Редколлегия: Е.В. Данильчук, А.Н. Сергеев, Н.В. Борисова, С.Н. Касьянов, Л.Ю. Кравченко, К.А. Попов, Е.М. Филиппова. – Волгоград: Издательство ВГПУ "Перемена", 2014. – С. 176-178.
11. Грибунин В.Г., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Криптография и безопасность цифровых систем: Учебное пособие. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2011. 411 с.
12. Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Соколов С.Ю. Концептуальные основы построения систем обеспечения взаимной аутентификации объектов - Известия института инженерной физики, 2008. № 4(10). С.6-9.
13. Шишкин Г., Николаев Д. Селекторы цифровых команд. Часть 4 // Компоненты и технологии. 2009. № 11 (100). С.102-106.
14. Шишкин Г., Николаев Д. Селекторы цифровых команд. Часть 3 // Компоненты и технологии. 2009. № 9 (98). С.116-120.

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ РЕАГИРОВАНИЯ НА УЯЗВИМОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Сергеева О.А.[1], Дротенко А.А.[2], Седаков А.В.[2]
[1]ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров
[2]Министерство обороны Российской Федерации, г.Москва

Сложные технические системы – от промышленных предприятий и энергосетей до транспортных комплексов и космических аппаратов – составляют основу современной цивилизации. Их бесперебойное функционирование критически важно для экономики, безопасности и качества жизни. Одновременно с ростом сложности этих систем увеличивается и их поверхность атаки: растёт число программно-аппаратных компонентов, расширяются сетевые взаимодействия, внедряются технологии интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта [1].

Управление уязвимостями в таких системах традиционно строится на циклической модели: идентификация – оценка – устранение – контроль. Однако эта модель, закреплённая в стандартах (ISO/IEC 27001, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001), предполагает дискретные во времени процедуры и не учитывает динамику реальных атак, которые могут развиваться за минуты и даже секунды [2]. Злоумышленники постоянно совершенствуют тактики, а новые уязвимости (в том числе класса zero-day) появляются быстрее, чем организации успевают на них реагировать.

В этих условиях возникает потребность в адаптивных моделях реагирования – системах, способных в реальном времени отслеживать состояние защищённости, прогнозировать развитие угроз и автоматически или полуавтоматически принимать меры по нейтрализации уязвимостей до того, как они будут использованы [3].

Цель настоящего доклада – предложить концептуальную архитектуру адаптивной модели, оценить ключевые компоненты и ограничения, а также определить направления дальнейших исследований. Современные подходы к управлению уязвимостями можно разделить на три поколения [4].

Первое поколение (реактивное) – основано на сканировании сети и приложений, формировании отчётов и ручном устранении обнаруженных проблем. Характерно для большинства организаций. Основные недостатки: периодичность (сканирования проводятся раз в неделю/месяц), высокая трудоёмкость, отсутствие учёта контекста (важности актива, доступности извне).

Второе поколение (процессное) – внедрение процессов управления уязвимостями в соответствии со стандартами, приоритезация на основе критичности (CVSS), интеграция с системами учёта конфигураций (CMDB). Недостатки: статичность оценок (CVSS не учитывает изменяющуюся обстановку), запаздывание реагирования, слабая автоматизация.

Третье поколение (риск-ориентированное) – использование систем класса Vulnerability Management (VM) и Vulnerability Risk Management (VRM), которые оценивают не только техническую критичность, но и бизнес-риски, доступность эксплойтов, активность злоумышленников в отношении конкретных типов уязвимостей [5].

Однако даже риск-ориентированные системы остаются, по сути, аналитическими надстройками над данными сканирования. Они не обеспечивают непрерывного адаптивного реагирования в реальном времени и не учитывают динамику изменений конфигурации системы, которые могут создавать новые каналы реализации угроз.

В области киберфизических систем (КФС) ситуация осложняется наличием физических компонентов, уязвимости которых (например, некорректная калибровка датчиков, износ механизмов) не описываются традиционными базами CVE и требуют иных подходов к мониторингу [6].

Адаптивная модель реагирования на уязвимости должна представлять собой кибернетическую систему с обратной связью, непрерывно получающую данные о состоянии защищаемого объекта, обрабатывающую их с использованием методов анализа рисков и машинного обучения, и вырабатывающую управляющие воздействия, направленные на минимизацию рисков [7].

Предлагаемая модель базируется на следующих принципах:

1) непрерывность – мониторинг уязвимостей и угроз осуществляется в реальном времени, а не по расписанию;

2) адаптивность – модель изменяет своё поведение (пороги срабатывания, выбираемые контрмеры) в зависимости от текущей обстановки и накопленного опыта;

3) контекстность – решения принимаются с учётом архитектуры системы, критичности активов, доступных ресурсов противодействия;

4) проактивность – модель не только реагирует на обнаруженные уязвимости, но и прогнозирует возможные векторы атак, инициируя упреждающие меры;

5) автоматизация – максимально возможная автоматизация процессов сбора данных, анализа и принятия решений при сохранении контроля со стороны оператора.

Концептуальная архитектура адаптивной модели включает следующие функциональные блоки:

- подсистема сбора данных агрегирует информацию из разнородных источников:

а) сканеры безопасности (активные и пассивные) – данные об известных уязвимостях (CVE), ошибках конфигурации;

б) системы мониторинга событий ИБ (SIEM) – события аутентификации, сетевые соединения, срабатывания правил корреляции;

в) системы учёта конфигураций (CMDB) – состав оборудования, версии ПО, связи между компонентами;

г) датчики физического уровня (в КФС) – вибрация, температура, токи, показывающие аномалии в работе оборудования;

д) внешние источники угроз – данные об активных эксплойтах, кампаниях злоумышленников, новых уязвимостях;

- подсистема анализа и прогнозирования выполняет:

а) обогащение данных – сопоставление уязвимостей с конкретными активами, учёт их доступности и критичности;

б) оценку риска в реальном времени – динамический расчёт показателей риска на основе модели угроз, текущей конфигурации, данных об активности злоумышленников;

в) прогнозирование – использование методов машинного обучения (рекуррентные нейросети, модели временных рядов) для предсказания вероятности реализации той или иной уязвимости в ближайшем будущем [8];

г) приоритезацию – ранжирование выявленных проблем по степени срочности реагирования;

- подсистема принятия решений на основе результатов анализа выбирает оптимальные контрмеры:

а) база знаний контрмер – содержит описание возможных действий: установка патча, блокировка доступа, изменение конфигурации, запуск защищенной среды, оповещение администратора;

б) механизм выбора – может использовать правила, деревья решений, методы обучения с подкреплением для выбора наилучшего действия в текущем контексте;

в) оценка последствий – моделирование эффекта от применения контрмеры (снижение риска, возможные побочные эффекты);

- подсистема исполнения реализует выбранные контрмеры через интеграцию с:

а) системами управления конфигурациями для автоматического применения изменений;

б) межсетевыми экранами и системами управления доступом для изоляции уязвимых узлов;

в) системами класса SOAR для оркестрации процессов реагирования;

г) интерфейсами оператора для утверждения критических действий;

- подсистема обратной связи и обучения анализирует результаты принятых мер, эффективность прогнозов, накапливает данные для дообучения моделей машинного обучения.

Одной из центральных задач адаптивной модели является прогнозирование того, какие уязвимости с наибольшей вероятностью будут использованы злоумышленниками в ближайшее время. Традиционные подходы, основанные на оценке CVSS и наличии эксплойтов, дают лишь статическую картину.

В работе [9] предложен метод прогнозирования векторов атак на основе графов атак и временных рядов событий безопасности. Граф атак строится по данным о конфигурации системы и известным уязвимостям, а динамические характеристики (активность сканирования, попытки эксплуатации) используются для оценки вероятности перехода между состояниями.

Нейросетевые подходы, включая графовые нейронные сети (GNN), позволяют учитывать топологию системы и выявлять скрытые закономерности в последовательностях атак [10].

Для динамической оценки риска предлагается использовать формализм, аналогичный риск-метрикам в финансовой сфере, адаптированный для кибербезопасности. Риск реализации уязвимости $R_i(t)$ может быть представлен как функция:

$R_i(t) = f(V_{i(t)}, A_{i(t)}, E_{i(t)}, C_{i(t)})$, где: $V_{i(t)}$ – техническая критичность уязвимости (может меняться со временем, например, при появлении новых эксплойтов); $A_{i(t)}$ – доступность актива (изменяется при изменении конфигурации сети); $E_{i(t)}$ – уровень активности злоумышленников в отношении данного типа уязвимостей; $C_{i(t)}$ – критичность актива для бизнес-процессов.

Значения этих параметров обновляются в реальном времени по мере поступления данных из подсистемы сбора.

Выбор контрмер в адаптивной модели может быть реализован как задача обучения с подкреплением (Reinforcement Learning) [11]. Агент взаимодействует со средой (защищаемой системой), наблюдая её состояние (вектор уязвимостей, текущие риски, доступные ресурсы) и выбирая действия, которые минимизируют ожидаемый ущерб. Награда агента определяется снижением риска и затратами на реализацию контрмер. Такой подход позволяет модели обучаться на истории инцидентов и постепенно улучшать качество решений.

Для критических систем, где недопустимы ошибки, целесообразно использовать гибридные схемы: автоматическое применение только низкорисковых контрмер (например, блокировка доступа из ненадёжных сетей), а для потенциально опасных действий – выдача рекомендаций оператору.

Современный уровень развития технологий позволяет говорить о принципиальной возможности создания описанной модели:

- существуют развитые платформы сбора и анализа данных (SIEM, UEBA, EDR), способные обрабатывать терабайты событий в реальном времени;

- методы машинного обучения (включая глубокие нейросети) достигли уровня, позволяющего решать задачи прогнозирования и классификации с приемлемой точностью;

- развиваются стандарты автоматизации (STIX/TAXII, OpenC2), обеспечивающие совместимость между различными системами безопасности;

- появляются отечественные разработки в области SOAR (например, «Спектр» R-Vision, Kaspersky SOAR), которые могут служить основой для подсистемы исполнения.

Ограничения и проблемы.

Полнота и достоверность данных. Адаптивная модель требует непрерывного поступления данных из множества источников. В реальных системах возможны пробелы: не все компоненты оснащены средствами мониторинга, некоторые уязвимости могут быть неизвестны (в том числе нулевого дня), данные об угрозах могут быть неполными.

Вычислительная сложность. Построение графов атак и расчёт рисков для крупномасштабных систем (сотни тысяч узлов) требует значительных вычислительных ресурсов. Необходима разработка эффективных алгоритмов, возможно, с использованием потоковой обработки и аппроксимаций.

Доверие к автоматизированным решениям. В системах критической инфраструктуры (АЭС, транспорт) любое автоматическое действие, изменяющее конфигурацию, несёт потенциальный риск нарушения функционирования. Требуется тщательная верификация моделей и, вероятно, законодательное регулирование границ автономности.

Адаптация к российским условиям. Необходимо создание отечественных аналогов зарубежных систем, а также баз знаний по уязвимостям, учитывающих специфику используемого в России оборудования и ПО (в том числе в рамках импортозамещения).

В России ведутся активные разработки в области адаптивных систем защиты. Например, разрабатывается методология построения адаптивных систем защиты информации на основе анализа рисков и прогнозирования угроз [12]. В Университете Иннополис исследуются методы машинного обучения для обнаружения аномалий в промышленных сетях [13].

Однако полноценной коммерческой реализации адаптивной модели реагирования на уязвимости, удовлетворяющей всем перечисленным принципам, пока не существует – это область активных исследований и разработок.

На основе проведённого анализа можно выделить следующие направления для дальнейших исследований:

1. Разработка методов верификации и валидации адаптивных моделей – как доказать, что модель будет принимать корректные решения в любых, включая непредвиденные, ситуациях.
2. Создание гибридных моделей, сочетающих машинное обучение и формальные методы – для обеспечения гарантий безопасности в критических применениях.
3. Адаптация моделей для киберфизических систем – учёт физических процессов, временных задержек, особенностей промышленных протоколов.
4. Исследование устойчивости самих адаптивных моделей к атакам – возможность обмана модели злоумышленником (adversarial machine learning).
5. Разработка отечественной платформы для реализации адаптивного реагирования – интеграция существующих разработок (SIEM, SOAR, сканеров) в единую экосистему.
6. Создание методик оценки экономической эффективности – обоснование целесообразности внедрения адаптивных моделей для различных классов объектов.

Анализ современного состояния проблемы управления уязвимостями в сложных технических системах показывает, что традиционные подходы, основанные на периодических оценках и ручном реагировании, перестают отвечать требованиям по скорости и адекватности противодействия угрозам. Необходим переход к адаптивным моделям, способным в реальном времени отслеживать изменения обстановки, прогнозировать развитие атак и автоматизированно принимать меры по снижению рисков.

В докладе предложена концептуальная архитектура такой модели, выделены ключевые компоненты, рассмотрены методы их реализации и проанализированы ограничения. Показано, что при современном уровне развития технологий (машинное обучение, потоковая обработка данных, автоматизация) создание адаптивной модели реагирования технически осуществимо, однако требует решения ряда научных и инженерных проблем, связанных с полнотой данных, вычислительной сложностью, доверием к автоматизированным решениям и адаптацией к российским условиям.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на создание работающих прототипов, их апробацию на реальных объектах и разработку нормативной базы, регламентирующей применение автоматизированных систем реагирования на критически важных объектах. Успешное решение этих задач позволит существенно повысить

защищённость сложных технических систем, составляющих основу национальной инфраструктуры.

Список литературы:

1. Методы и средства обеспечения программно-аппаратной защиты информации: Президентская программа переподготовки инженерных кадров. Научно-техническое издание / А. И. Астайкин, А. П. Мартынов, Д. Б. Николаев, В. Н. Фомченко. – Саров: Российский Федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 2015. – 214 с.
2. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements.
3. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
4. Подгруппы симметрических групп подстановок ряда факториальных множеств / А.П. Мартынов, И.А. Мартынова, Д.Б. Николаев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 1. – С. 53-62.
5. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
6. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
7. Одинцов, М. В. Исследование вопросов оптимизации параметров защищенности информации / М. В. Одинцов, Д. В. Сплюхин, Д. Б. Николаев // Математика и математическое моделирование: Сборник материалов IX всероссийской молодежной научно-инновационной школы, Саров, 08–10 апреля 2015 года. – Саров: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2015. – С. 75.
8. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
9. Грибунин В.Г., Костюков В.Е., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Стеганографические системы. Критерии и методическое обеспечение. Учебно-методическое пособие. Грибунин В.Г (ред.). Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ"; 2016. 324с.
10. Динамическая аутентификация группы разнородных объектов / В. Е. Костюков, А. П. Мартынов, Д. Б. Николаев [и др.] // Информатизация образования-2014 : Материалы Международной научно-практической конференции, Волгоград, 23–26 апреля 2014 года / Редколлегия: Е.В. Данильчук, А.Н. Сергеев, Н.В. Борисова, С.Н. Касьянов, Л.Ю. Кравченко, К.А. Попов, Е.М. Филиппова. – Волгоград: Издательство ВГПУ "Перемена", 2014. – С. 260-262.
11. Основы защиты информации от утечки по техническим каналам / А.А. Евстифеев, В.И. Ерошев, А.П. Мартынов [и др.]. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – 267 с.
12. Казаков А.А., Евстифеев А.А., Ерошев В.И., Николаев Д.Б. Исследование метода многопозиционного приема при обнаружении сигналов побочного электромагнитного излучения. Сборник материалов XI Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Саровский физико-технический институт. 2017. С. 16-17.
13. Евстифеев А.А., Ерошев В.И., Казаков А.А., Николаев Д.Б. Исследование перспективных технических каналов утечки информации. Сборник материалов XII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы "Математика и математическое моделирование". Саров. 2018 г. С. 15-16
14. Евстифеев А.А., Николаев Д.Б., Шишков В.Ю. Исследование характеристик скрытых электромагнитных каналов связи. Сборник материалов XIV Всероссийской молодежной научно-инновационной школы "Математика и математическое моделирование". Саров 2020 г. С. 123-124.

РАЗВИТИЕ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДОЛОГИИ ПОСТКВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ: ОТ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ К ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Пасько Н.С., Фомченко В.Н.

ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Развитие квантовых вычислений создаёт экзистенциальную угрозу для современных криптографических систем, обеспечивающих безопасность цифрового мира. Алгоритмы RSA и ECC, основанные на трудности факторизации целых чисел и дискретного логарифмирования, могут быть взломаны с помощью алгоритма Шора при появлении достаточно мощного квантового компьютера [1, 2]. При этом угроза актуальна уже сегодня из-за атак типа «Harvest Now, Decrypt Later» (HNDL), когда злоумышленники собирают зашифрованные данные в расчёте на их дешифровку после появления криптографически релевантного квантового компьютера (CRQC).

Постквантовая криптография (PQC) представляет собой класс криптографических алгоритмов, устойчивых к атакам как с использованием классических, так и квантовых компьютеров. В отличие от квантовой криптографии, использующей квантовые эффекты для распределения ключей, PQC опирается на математические задачи, которые остаются сложными для решения даже на квантовых вычислителях.

Цель данного доклада – исследовать решения, методологию перехода и перспективные направления исследований постквантовой криптографии.

В основе постквантовой криптографии лежат математические задачи, которые считаются сложными как для классических, так и для квантовых алгоритмов [3].

Наиболее перспективное и широко применяемое семейство – криптография на решётках (Lattice-based Cryptography). Ее стойкость основана на сложности задач поиска кратчайшего вектора (SVP) и обучения с ошибками (Learning With Errors, LWE). Преимущества: высокая производительность, компактные ключи и подписи, возможность построения продвинутых криптографических конструкций.

Стандартизированные алгоритмы:

- ML-KEM (Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism) – механизм инкапсуляции ключей на основе модульных решёток (FIPS 203);
- ML-DSA (Module-Lattice-Based Digital Signature Algorithm) – алгоритм цифровой подписи (FIPS 204), адаптацией которого является алгоритм Dilithium.

Криптография на хеш-функциях (Hash-based Cryptography) основана на стойкости криптографических хеш-функций. Обеспечивает высокую безопасность, но имеет ограничения: подписи большого размера и, в классических схемах, необходимость отслеживания состояния.

Стандартизированный алгоритм – SLH-DSA (Stateless Hash-Based Digital Signature Algorithm) – алгоритм на основе хеш-функций без сохранения состояния (FIPS 205), ранее известный как SPHINCS+.

Криптография на кодах коррекции ошибок (Code-based Cryptography) – основана на сложности декодирования случайных линейных кодов. Наиболее известный алгоритм – BIKE (Bit Flipping Key Encapsulation) и классический McEliece, который обеспечивает высокую безопасность, но имеет очень большие открытые ключи.

Криптография на многомерных квадратичных уравнениях (Multivariate Cryptography) основана на сложности решения систем многомерных квадратичных уравнений над конечными полями. Активно исследуется, но пока не вошла в первые стандарты NIST.

2026 год знаменует десятилетний юбилей проекта NIST по стандартизации постквантовой криптографии, начатого в 2016 году. За это время NIST получил заявки из 25 стран и провёл многолетний публичный криптоанализ. Кульминацией стала публикация в августе 2024 года трёх федеральных стандартов обработки информации (FIPS):

- FIPS 203 (ML-KEM) – для защиты ключей при передаче данных;
- FIPS 204 (ML-DSA) – для создания цифровых подписей;
- FIPS 205 (SLH-DSA) – дополнительный алгоритм подписи на основе хеш-функций.

В исследовании, опубликованном в IEEE Access, проведён сравнительный анализ стратегий перехода ведущих мировых агентств: NIST (США), ANSSI (Франция), BSI (Германия), CRYPTREC (Япония) и ENISA (ЕС). Несмотря на различия в политике

регулирования, наблюдаются общие приоритеты: поэтапное внедрение, обратная совместимость и снижение рисков через гибридное использование. Авторы предложили Institutional–Sectoral PQC Migration Convergence Framework – основу для сравнительной оценки готовности различных секторов к переходу на постквантовые стандарты.

В отчёте Объединённого исследовательского центра Еврокомиссии (JRC) подчёркивается критическая роль международного сотрудничества в стандартизации и включении квантово-устойчивых алгоритмов в схемы сертификации кибербезопасности. Европейская комиссия опубликовала скоординированную дорожную карту: начало перехода к концу 2026 года, завершение защиты критической инфраструктуры не позднее конца 2030 года.

Переход на постквантовую криптографию рассматривается как первое масштабное испытание криптографической гибкости – способности обновлять криптографические алгоритмы, типы ключей и политики безопасно, преимущественно через конфигурацию и стандартные интерфейсы, без перепроектирования каждого приложения [4, 5].

PQC-переход – это не просто одноразовое исправление, а катализатор создания устойчивой, адаптивной среды безопасности.

Предлагается шестиэтапный план перехода:

1. Включение PQC в повестку управления рисками – назначение ответственного, создание межфункциональной группы, определение процесса криптографических изменений.
2. Инвентаризация криптографии – создание реестра используемых алгоритмов, ключей, сертификатов, библиотек с привязкой к владельцам и жизненному циклу.
3. Создание фундамента криптографической гибкости – централизованное управление политиками и ключами, стандартные интерфейсы для приложений.
4. Подготовка инфраструктуры и гибридные пилоты – тестирование PQC в реалистичных сценариях (гибридный TLS, подпись долгоживущих артефактов).
5. Приоритезация внедрения и управление compliance – поэтапное развёртывание, обновление документации, контроль вендоров.
6. Вывод из эксплуатации устаревшей криптографии – институционализация непрерывного управления криптографическим жизненным циклом.

Европейская комиссия рекомендует использовать гибридные схемы, объединяющие PQC с существующими подходами (а также, где уместно, с квантовым распределением ключей – QKD). Это позволяет сохранить обратную совместимость и обеспечить плавный переход. В контексте сетей 6G исследователи предлагают гибридные схемы аутентификации и согласования ключей, интегрирующие PQC с AI-управляемыми механизмами доверия.

В России разработан первый прототип системы коллективной цифровой подписи, устойчивой к взлому с помощью квантовых компьютеров. Решение построено на основе международного постквантового алгоритма Dilithium и адаптирует для него классическую схему разделения секрета Шамира [6].

Ключевые особенности:

- распределённое доверие: ни один участник не обладает полным секретным ключом, что исключает его кражу или несанкционированное использование;
- применение: банковские системы (авторизация крупных транзакций), блокчейн-платформы (кошельки с пороговым доступом), критическая инфраструктура (управление электростанциями);
- техническая реализация: прототип на Python, планируется переписывание на Rust для промышленного использования.

Готовых решений, сочетающих постквантовую стойкость с пороговой логикой, практически не существует, что стало отправной точкой для исследования [7-9].

Эксперты Центра информационной безопасности Университета Иннополис и научной группы «Квантовая информатика и информационная безопасность» Университета «Сириус» представили два набора инструментов для создания квантово-устойчивых блокчейн-систем:

1. «Сириус-Q. Решатель QUBO» – для решения сложных оптимизационных задач по обеспечению квантовой устойчивости блокчейнов на основе метода квантового отжига и расширенной модели Поттса.
2. «Сириус-Q. КНАА-2-ЭЦП» – постквантовые криптографические примитивы и электронная подпись на основе алгебраических алгоритмов, базирующихся на трудности решения больших систем степенных уравнений.

Оба набора соответствуют четвёртому уровню доверия ФСТЭК России – высшей степени оценки доверия для гражданских информационных систем. Эти инструменты могут внести значительный вклад в построение технологического суверенитета в области цифровой инфраструктуры.

Следует отметить, что влияние квантовых вычислений на симметричную криптографию не столь разрушительно, как на асимметричную, однако существуют алгоритмы, уязвимые для квантовых атак [10, 11].

Ключевые аспекты:

- квантовые модели классифицируются по типу доступа нарушителя: локальный запуск квантовых алгоритмов или доступ в суперпозиции к реализации атакуемого алгоритма;
- квантовые эффекты вносят ограничения в методы обоснования безопасности, требуя новых доказательств для существующих алгоритмов;
- актуальные направления исследований: формальные модели безопасности блочных шифров в постквантовом контексте, анализ режимов работы, устойчивых к квантовым атакам.

Ключевые проблемы, препятствующие широкому внедрению PQC:

- алгоритмическая сложность и вычислительные накладные расходы (особенно для IoT и ограниченных устройств);
- размер ключей и подписей – значительно превышает классические аналоги;
- необходимость модернизации инфраструктуры – аппаратные корни доверия, часто не обновляемые после выпуска устройства;
- отсутствие формальной верификации реализаций.

Перспективные направления исследований:

- оптимизация для мобильных и встраиваемых систем: в контексте развития 6G сетей необходима оптимизация PQC-алгоритмов для работы в средах с ограниченными ресурсами (IoT, ультранизкие задержки). Требуются лёгкие реализации, протестированные на реальном оборудовании;
- формальная верификация и доказательство безопасности: необходимы новые методы обоснования безопасности криптографических алгоритмов в рамках квантовых формальных моделей. Особое внимание – обоснованию свойств, позволяющих ограничить область применения алгоритмов в инфраструктуре, включающей квантовые компьютеры;
- развитие симметричной постквантовой криптографии: актуальные направления включают: анализ квантовой стойкости существующих блочных шифров, разработку новых режимов, устойчивых к квантовым атакам, и создание формальных моделей безопасности для симметричных примитивов;
- гибридные схемы для долгосрочной безопасности: разработка и стандартизация гибридных схем, объединяющих классические и постквантовые алгоритмы, для обеспечения безопасности в переходный период и защиты от неизвестных будущих уязвимостей;
- пост-квантовая безопасность блокчейн-систем: исследование уязвимостей распределённых реестров к квантовым атакам и разработка механизмов самовосстановления для исключения необратимого коллапса систем.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Постквантовая криптография перешла от теоретических исследований к практической стандартизации. Публикация NIST стандартов FIPS 203, 204, 205 в 2024 году создала основу для промышленного внедрения.
2. Основные математические семейства – криптография на решётках (ML-KEM, ML-DSA), на хеш-функциях (SLH-DSA) и на кодах коррекции ошибок – обеспечивают различные компромиссы между безопасностью и производительностью.
3. Методология перехода строится на принципах криптографической гибкости, гибридных схемах и поэтапном внедрении с чёткими временными ориентирами (2026–2030).
4. Российские разработки демонстрируют высокий уровень.
5. Симметричная криптография требует нового обоснования в квантовых моделях, хотя и менее уязвима, чем асимметричная.
6. Реальный уровень внедрения пока крайне низок (0,029%), но демонстрирует положительную динамику.

Успех перехода требует продолжающегося глобального сотрудничества в стандартизации и включения квантово-устойчивых алгоритмов в схемы сертификации кибербезопасности. Для организаций, начинающих переход сегодня, критически важно не просто заменить алгоритмы, а выстроить систему непрерывного управления

криптографическим жизненным циклом – только так можно обеспечить устойчивость к будущим угрозам в эпоху квантовых вычислений.

Список литературы:

1. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
2. Подгруппы симметрических групп подстановок ряда факториальных множеств / А.П. Мартынов, И.А. Мартынова, Д.Б. Николаев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 1. – С. 53-62.
3. 6 Practical Steps to Crypto-Agile Post-Quantum Cryptography in 2026 // Cryptomathic. 23.01.2026.
4. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
5. Chenu M., Sportiello L. Post-Quantum Cryptography, the Journey so far and the Challenges Ahead // JRC Publications Repository. 2025. JRC144095.
6. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
7. Towards 6G Authentication and Key Agreement Protocol: A Survey on Hybrid Post Quantum Cryptography // IEEE. 2026.
8. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
9. Российские исследователи разработали инструменты для создания квантово-устойчивых национальных блокчейн-систем // CNews. 26.12.2025.
10. Cao P. et al. Post-Quantum Cryptography (PQC) Network Instrument: Measuring PQC Adoption Rates and Identifying Migration Pathways // Science of Security. 2025.
11. Булгакова, А. О. Анализ современных угроз информационной безопасности технических систем и технологических решений / А. О. Булгакова, Д. Б. Николаев, А. Е. Беликов // Математика и математическое моделирование : сборник материалов X всероссийской молодежной научно-инновационной школы, Саров, 12–14 апреля 2016 года. – Саров: Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 5-6.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ В ПЕРИМЕТРОВЫХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ

Николаев Н.Д.
НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород

Охрана периметра – первый и наиболее важный рубеж физической защиты любого объекта. Традиционные средства обнаружения (вибрационные датчики, инфракрасные барьеры, радиолучевые системы) имеют неустранимый недостаток: они генерируют большое количество ложных срабатываний, вызванных животными, ветром, осадками или техническими неисправностями [1-3]. Это приводит к утомлению операторов и снижению доверия к системе в целом.

Внедрение технологий машинного зрения и искусственного интеллекта кардинально меняет ситуацию. Современные системы не просто фиксируют движение – они понимают, что происходит в кадре, распознают типы объектов, оценивают характер их действий и принимают решение о необходимости реагирования. Как отмечается в исследовании Diext, «глубокое обучение обеспечивает системам охраны периметра наилучшую точность распознавания среди всех сравнительных методов».

Цель данного доклада – выявить технологические драйверы изменений и оценить перспективы дальнейшего развития.

Википедия выделяет четыре фундаментальные функции, которые автоматизирует видеоаналитика в системах охраны: обнаружение, слежение, распознавание и прогнозирование. Эволюция систем машинного зрения заключается в последовательном освоении и углублении каждой из этих функций.

Обнаружение перешло от простого выделения движущихся пикселей к семантической сегментации сцены и выделению значимых объектов на фоне.

Слежение сегодня обеспечивает непрерывное удержание цели даже при временном пропадании объекта из поля зрения нескольких камер, что критически важно для протяжённых периметров.

Распознавание из простой классификации («человек/животное/автомобиль») превратилось в многоуровневую систему, способную идентифицировать личность по лицу, определять принадлежность, различать типы техники [4, 5].

Прогнозирование – наиболее молодая функция – позволяет на основе анализа траектории и поведения объекта предсказывать его намерения (например, попытку пересечения запретной зоны) и упреждающе оповещать службу охраны.

Традиционные системы видеоаналитики использовали узкоспециализированные модели, обученные на ограниченном наборе классов объектов. Современный тренд – переход к большим мультимодальным моделям (Large Multimodal Models, LMM), способным интерпретировать сложные сцены и отвечать на вопросы на естественном языке.

Компания Hikvision в своих системах DeepinViewX применяет Vision Language Models (VLM), которые позволяют оператору задавать запросы типа «найти белый фургон» и мгновенно получать релевантные фрагменты видеозаписей. Это не просто поиск по тегам, а семантическое понимание содержимого видео.

Ключевое преимущество больших моделей – драматическое снижение ложных срабатываний. По данным Hikvision, применение больших моделей позволяет уменьшить количество ложных тревог на 90 % по сравнению с традиционными камерами с ИИ. Система научается отличать реальное вторжение от движения веток, теней или мелких животных, что было недоступно предыдущим поколениям систем.

Вторая важнейшая тенденция – отказ от использования только видеокамер в пользу интеграции разнородных сенсоров, объединённых общим интеллектуальным ядром.

Современная система охраны периметра включает:

- видеокамеры – для детального наблюдения и идентификации;
- тепловизоры – для работы в полной темноте и сложных погодных условиях (туман, дождь, дым);
- радары – для обнаружения целей на больших расстояниях (до нескольких километров) и точного определения координат;
- оптоволоконные системы (Distributed Acoustic Sensing, DAS) – для охраны протяжённых линейных участков (до 100 км) в условиях отсутствия инфраструктуры.

Каждый тип сенсора компенсирует недостатки других. Радар обнаруживает движение за километры, но не может идентифицировать объект. Тепловизор работает в любых условиях освещённости, но имеет меньшую дальность. Видеокамера даёт максимальную детализацию, но требует хорошей освещённости. Интеллектуальное ядро объединяет данные от всех сенсоров, обеспечивая автоматическую верификацию целей: радар засёк движение и навёл тепловизор, тепловизор подтвердил наличие человека, камера идентифицировала его.

Третья тенденция – перемещение вычислительных мощностей непосредственно к источникам данных. Вместо передачи видео на центральный сервер для анализа, обработка выполняется на камерах или специализированных вычислителях, установленных на периметре [6].

Это даёт ряд критических преимуществ:

- автономность: система продолжает работу при потере связи с центром;
- мгновенная реакция: время от события до оповещения сокращается до 1–2 секунд;
- экономия трафика: по каналам связи передаются только метаданные и тревоги;
- приватность и безопасность: конфиденциальные данные не покидают периметр объекта

Адаптивная система контроля периметра с использованием БПЛА может строиться на автономных вычислительных модулях, способных формировать понимание обстановки без постоянной связи с центром.

Четвёртая тенденция – отказ от жёстко заданных сценариев в пользу систем, способных адаптироваться к конкретным условиям объекта и обучаться в процессе эксплуатации.

Проект «Белый лист» представляет систему, которая начинает работу с «чистого состояния» и постепенно формирует собственное понимание наблюдаемой обстановки,

обучаясь распознавать объекты и события, представляющие интерес именно для данного объекта охраны.

Аналогичный подход реализован в системе Scale AI, где модель проходит несколько итераций дообучения (MLOps cycles) на данных с конкретного объекта, что позволяет последовательно улучшать точность распознавания наиболее сложных классов целей.

Команда VisionCheck AI также делает акцент на доработку моделей за счёт данных, получаемых с пилотных объектов, и обратной связи от клиентов.

Видеоаналитика активно применяется для контроля соблюдения правил безопасности на производстве. Система VisionCheck AI выявляет отсутствие касок, спецодежды, а также опасные ситуации – скопление людей, бег в запрещённых зонах, падения.

Годовой ущерб бизнеса от нарушений регламентов (например, отсутствие касок на стройках) может достигать 200 млрд рублей, а автоматический контроль позволяет существенно снизить эти потери.

Для охраны линейных объектов большой протяжённости (трубопроводы, линии электропередачи, границы) оптимальным решением становится комбинация оптоволоконных систем и БПЛА [7].

Оптоволоконный датчик на базе технологии DAS способен контролировать до 100 км периметра с одного устройства, точно определяя место попытки подкопа или перерезания кабеля. При обнаружении вторжения система автоматически наводит дрон или поворотную камеру для визуальной верификации.

Проект адаптивной системы контроля периметра на базе БПЛА и интеллектуальная система ISOD развивают именно это направление, создавая полностью автономные патрульные комплексы для охраны удалённых объектов [8].

Ложные срабатывания остаются ключевой проблемой периметровых систем. Традиционные детекторы движения не способны отличить нарушителя от животного или ветки. Это приводит к т.н. «синдрому плацебо» — операторы перестают реагировать на сигналы тревоги.

Современные системы решают эту проблему комплексно:

1) большие модели обеспечивают контекстное понимание сцены и классификацию объектов;

2) мультисенсорная верификация – подтверждение события несколькими независимыми датчиками;

3) поведенческий анализ – оценка траектории и действий объекта для определения угрозы.

Анализ современных тенденций позволяет выделить следующие перспективные направления:

- полностью автономные патрульные системы – развитие роевого интеллекта и группового управления БПЛА позволит создавать системы, где группа дронов автономно патрулирует периметр, взаимодействует друг с другом и с наземными сенсорами, принимает решения о реагировании без участия человека;

- интеграция с когнитивными сервисами – подключение систем охраны периметра к большим языковым моделям позволит операторам взаимодействовать с ними на естественном языке, задавать сложные аналитические запросы, получать сводки и прогнозы;

- предиктивная аналитика на основе временных рядов – использование рекуррентных нейросетей (LSTM) с механизмами внимания для прогнозирования рисков на основе анализа временных рядов событий позволит предсказывать попытки нарушений и упреждающе усиливать охрану на проблемных участках;

- пост-квантовая безопасность – по мере развития квантовых вычислений системы охраны периметра, передающие данные по открытым каналам, должны будут переходить на пост-квантовые криптоалгоритмы, защищённые от атак с использованием квантовых компьютеров;

- суверенные решения – создание полностью отечественных систем машинного зрения для охраны периметра, работающих в закрытом контуре и не зависящих от зарубежных облачных сервисов.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы [9-12]:

1. Машинное зрение становится центральным компонентом современных систем охраны периметра, обеспечивая переход от простой фиксации событий к интеллектуальному анализу обстановки.

2. Четыре ключевые тенденции определяют развитие отрасли: большие мультимодальные модели для контекстного анализа; мультисенсорная интеграция; периферийный интеллект; адаптивность и обучение в процессе эксплуатации.

3. Проблема ложных срабатываний решается за счёт интеллектуальной классификации объектов и многосенсорной верификации, что снижает число ложных тревог на 90 %.

4. Российские разработки демонстрируют конкурентоспособность и соответствие мировым тенденциям, особенно в части локальной обработки данных и адаптивных алгоритмов.

5. Перспективное развитие связано с созданием полностью автономных патрульных систем, интеграцией с когнитивными сервисами, предиктивной аналитикой и обеспечением пост-квантовой безопасности.

Как отмечает создатель VisionCheck AI Давид Восканян, «скорость реакции в одну-две секунды позволяет локализовать и оперативно предотвратить последствия инцидента, а иногда и успеть его остановить». Именно это – не просто обнаружение, а предотвращение угроз – становится главной целью развития машинного зрения в системах охраны периметра.

Список литературы:

1. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
2. ISOD: Интеллектуальная информационная система мониторинга безопасности периметра промышленных и критических объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) // GitHub. – 2025. – URL: https://github.com/KoWalevDV/ISOD.
3. Machine Perception for Human Protection: Creating Vision Algorithms to Augment Perimeter Security // Scale AI. – 2025. – URL: https://scale.com/blog/perimeter-security.
4. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
5. Система машинного зрения для обнаружения вторжения в запретную зону // Diext. – 2025. – URL: https://diext.ru/2025/04/04/sistema-mashinnogo-zreniya-dlya-obnaruzheniya-vtorzheniya-v-zapretnuju-zonu.
6. Казаков, А. А. Разработка предложений по оценке защищенности информации, обрабатываемой разнородными техническими системами / А. А. Казаков, А. А. Евстифеев, Д. Б. Николаев // Математика и математическое моделирование: Сборник материалов XVII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы, Саров, 05–07 апреля 2023 года. – Саров: Общество с ограниченной ответственностью "Интерконтакт", 2023. – С. 33-34.
7. Elevating perimeter security with large-scale AI and multi-sensing solutions // HikVision. — 2026. — URL: https://www.hikvision.com/uk/newsroom/hiksnap/elevating-perimeter-security-with-large-scale-AI-and-multi-sensing-solutions
8. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
9. Computer Vision Perimeter Security System // НИУ ВШЭ. — 2025. — URL: https://www.hse.ru/en/edu/vkr/1051972586.
10. Основы защиты информации от утечки по техническим каналам / А.А. Евстифеев, В.И. Ерошев, А.П. Мартынов [и др.]. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – 267 с.
11. Мартынов, А. П. Криптография и электроника: Книга для студентов, аспирантов / А. П. Мартынов, Д. Б. Николаев, В. Н. Фомченко. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2020. – 552 с.
12. Вавилкин О.Е., Николаев Д.Б., Сплюхин Д.В. Разработка универсального flash- устройства на основе отладочной платы LDM-K1986BE92QI // Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XI Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Саровский физико-технический институт. 2017. С. 9.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ АРХИТЕКТУРАМИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Мартынова И.А., Запонов Э.В., Лебедева А.В.

Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Искусственные нейронные сети (ИНС) представляют собой класс математических моделей, построенных по аналогии с принципами функционирования биологических нейронных структур. С теоретической точки зрения, нейронная сеть – это параметрическая функция, отображающая входное пространство в выходное посредством композиции простых нелинейных преобразований. Каждый искусственный нейрон получает входные сигналы, преобразует их с помощью весовых коэффициентов и функции активации, а затем передает результат дальше [1].

Фундаментальное свойство нейронных сетей заключается в их способности к универсальной аппроксимации: при достаточном количестве скрытых слоёв и нейронов сеть способна аппроксимировать любую непрерывную функцию с заданной точностью. Однако теорема об универсальной аппроксимации не даёт ответа на вопрос, какую именно архитектуру следует выбрать для конкретной задачи и какими свойствами будет обладать порождаемая функция [2].

Цель данного доклада – провести теоретический анализ зависимости свойств результирующих функций от архитектуры нейронной сети, классифицировать архитектуры по типу порождаемых отображений и выявить фундаментальные ограничения различных подходов.

Математически работу отдельного нейрона можно описать следующим образом:

$$y = f\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b\right),$$

где x_i – входные сигналы, w_i – весовые коэффициенты, b – смещение (bias), f – функция активации. Тип функции активации существенно влияет на свойства порождаемой сетью функции в целом.

Выделяются три основных типа функций активации:

- функция единичного скачка (пороговая – порождает кусочно-постоянные функции, пригодные для задач классификации с жёсткими границами;
- кусочно-линейная функция – обеспечивает линейность в определённых диапазонах, что упрощает оптимизацию;
- сигмоидальная функция – гладкая нелинейность, дифференцируема на всей области определения, что критически важно для градиентных методов обучения.

Композиция нескольких слоёв с нелинейными функциями активации порождает функции высокой сложности. Нейросети – это очень гибкая функция с множеством настроек. По сути, нужно минимизировать ошибки – минимизировать разницу между предсказанием и реальностью.

Способность нейросетей находить нелинейные закономерности в данных без явного программирования перекрёстных признаков является их ключевым преимуществом. Вместо того чтобы вручную конструировать пересечения признаков, как в линейных моделях, нейронная сеть автоматически изучает оптимальные комбинации в процессе обучения.

Анализ литературы позволяет выделить три фундаментальных класса архитектур нейронных сетей, а также ряд специализированных архитектур, каждая из которых порождает функции с характерными свойствами [3].

Сети прямого распространения (функции аппроксимации).

Многослойные сети прямого распространения (Feedforward Neural Networks) являются наиболее изученным классом. Они реализуют отображение входного вектора в выходной без обратных связей.

Свойства порождаемых функций:

- универсальность аппроксимации: многослойный перцептрон с сигмоидальными функциями активации способен аппроксимировать любую непрерывную функцию на компактном множестве;
- статичность: выход зависит только от текущего входа, без учёта предыстории;
- гладкость: при использовании дифференцируемых функций активации порождаемая функция также является дифференцируемой.

RBF-сети (Radial Basis Function Networks) представляют особый подкласс сетей прямого распространения. Они используют радиальные базисные функции в скрытом слое и линейную комбинацию в выходном. Порождаемые функции обладают свойством локальности: каждый

скрытый нейрон отвечает за определённую область входного пространства, что обеспечивает быструю сходимость обучения, но требует большего числа нейронов.

Свёрточные сети (функции с инвариантностью).

Свёрточные нейронные сети (CNN) разработаны специально для задач, где важна пространственная структура данных, например, обработка изображений. Они используют фильтры для выделения признаков на разных уровнях абстракции.

Свойства порождаемых функций:

- инвариантность к сдвигам: свёрточная архитектура обеспечивает свойство, при котором сдвиг входного изображения приводит к такому же сдвигу в картах признаков, но не изменяет факт обнаружения объекта;
- иерархичность абстракций: ранние слои выделяют простые признаки (края, углы), поздние – сложные (объекты, сцены);
- локальность рецептивных полей: каждый нейрон связан только с локальной областью входа, что порождает функции, учитывающие пространственную близость элементов.

Рекуррентные сети (функции последовательной динамики).

Рекуррентные нейронные сети (RNN) имеют обратные связи, что позволяет им эффективно работать с временными рядами и последовательными данными.

Свойства порождаемых функций:

- наличие памяти: выход в момент времени t зависит не только от текущего входа, но и от скрытого состояния, аккумулирующего информацию о предыдущих элементах последовательности;
- динамическое поведение: функция, реализуемая RNN, является рекуррентной и может демонстрировать сложную динамику, включая устойчивые состояния (аттракторы);
- проблема затухания градиента: функции, порождаемые простыми RNN, имеют тенденцию «забывать» далёкие зависимости из-за экспоненциального затухания градиентов во времени.

Трансформеры (функции контекстного внимания).

Трансформеры применяют механизмы внимания для параллельной обработки последовательностей. Они стали доминирующей архитектурой для обработки естественного языка.

Свойства порождаемых функций:

- попарное взаимодействие: функция учитывает связи между всеми элементами последовательности одновременно, а не последовательно;
- взвешивание важности: механизм внимания порождает функцию, которая динамически определяет, каким элементам входа придавать больший вес при формировании выхода;
- параллелизуемость: в отличие от рекуррентных сетей, функции, реализуемые трансформерами, допускают эффективное распараллеливание вычислений.

Трансформеры самые популярные и имеют преимущество в обработке последовательностей данных, таких как текст и музыка.

Теорема об универсальной аппроксимации утверждает, что многослойный перцептрон с одним скрытым слоем и сигмоидальной функцией активации может аппроксимировать любую непрерывную функцию на компактном множестве с любой желаемой точностью.

Однако, как подчёркивается в литературе, «существующие теоретические результаты дают лишь слабые ориентиры для выбора этих параметров в практических приложениях». Теорема не говорит о том, сколько именно нейронов потребуется, какова будет способность к обобщению и как избежать переобучения [4, 5].

Анализ показывает наличие ряда фундаментальных проблем при проектировании нейросетевых архитектур:

- определение числа слоёв: теоретически не обосновано, сколько слоёв необходимо для данной задачи;
- выбор числа нейронов в слое: существующие методы носят эвристический характер;
- обобщающая способность: предсказание того, как сеть будет реагировать на данные, не включённые в обучающую выборку, остаётся сложной задачей;
- размер обучающей выборки: отсутствуют строгие критерии для определения минимального объёма данных, гарантирующего хорошее обобщение.

Способность нейросети к обобщению тесно связана со свойствами порождаемой функции. Гладкие функции с ограниченной вариацией, как правило, лучше обобщают, чем функции с резкими осцилляциями. ИИ не «понимает» как человек. Он подбирает параметры,

чтобы хорошо предсказывать на похожих примерах. Это означает, что свойства функции определяются не только архитектурой, но и распределением обучающих данных.

В таблице 1 представлено сравнение свойств функций, порождаемых различными архитектурами нейронных сетей.

Таблица 1. Свойства функций различных архитектур ИНС

Архитектура	Тип зависимости	Инвариантность	Динамика	Характер обобщения
Сети прямого распространения	Статическая	Отсутствует	Отсутствует	Гладкая аппроксимация
Свёрточные сети	Статическая	К пространственным сдвигам	Отсутствует	Выделение локальных паттернов
Рекуррентные сети	Динамическая	Отсутствует	Рекуррентная	Моделирование временных зависимостей
Трансформеры	Контекстная	К перестановкам (с позиционными кодировками)	Параллельная	Попарное взаимодействие элементов
Самоорганизующиеся карты Кохонена	Топологическая	Сохранение топологии	Отсутствует	Кластеризация с сохранением соседства
Сети адаптивного резонанса (ART)	Адаптивная	Зависит от параметра сходства	Пластичность /стабильность	Создание новых категорий

Перспективные направления

Спайковые нейронные сети представляют принципиально другой подход к вычислениям, который ближе к биологическому мозгу. В этой архитектуре нейрон копит напряжение во времени и генерирует импульс (спайк) при достижении порога.

Свойства порождаемых функций:

- временная динамика: функция учитывает не только значения, но и моменты событий;
- энергоэффективность: вычисления происходят только при наличии спайков;
- аппаратная реализация: появляются специализированные чипы, где «событийные вычисления» реализованы на аппаратном уровне.

За спайковыми сетями будущее, ведь они работают через импульсы во времени, прямо как в мозге человека.

Перспективным направлением является создание гибридных архитектур, комбинирующих свойства различных классов функций. Например, архитектуры, сочетающие свёрточные слои с механизмами внимания, порождают функции, обладающие одновременно инвариантностью к сдвигам и способностью учитывать контекст [6, 7].

Остаётся актуальной задача развития теоретических методов, позволяющих предсказывать, какая архитектура оптимальна для заданного класса функций. Исследования в области теории приближения функций и статистической теории обучения могут дать более строгие критерии выбора.

Проведённый теоретический анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Архитектура нейронной сети определяет класс порождаемых функций. Сети прямого распространения реализуют универсальные аппроксиматоры, свёрточные сети – функции с инвариантностью к сдвигам, рекуррентные сети – функции с памятью, трансформеры – функции контекстного внимания.

2. Функции активации играют ключевую роль в формировании свойств отображения. Выбор между пороговыми, линейными и сигмоидальными функциями определяет гладкость, дифференцируемость и характер нелинейности.

3. Теорема об универсальной аппроксимации даёт лишь качественную гарантию, но не решает проблем практического проектирования. Вопросы выбора числа слоёв, нейронов и размера обучающей выборки остаются открытыми.

4. Структура данных имеет значение – разные архитектуры «подсказывают» модели структуру мира: для изображений важны локальные паттерны, для текста – контекст, для временных рядов – последовательность.

5. Перспективные архитектуры (спайковые сети, гибридные модели) расширяют класс реализуемых функций, приближаясь к биологическим прототипам и открывая новые возможности для энергоэффективных вычислений.

Таким образом, теоретический анализ свойств функций, порождаемых различными архитектурами ИИ, не только углубляет понимание принципов работы нейросетей, но и создаёт основу для более обоснованного выбора архитектур при решении практических задач.

Список литературы:

1. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
2. Подгруппы симметрических групп подстановок ряда факториальных множеств / А.П. Мартынов, И.А. Мартынова, Д.Б. Николаев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 1. – С. 53-62.
3. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
4. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
5. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
6. Бабанов Н.Ю., Евстифеев А.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Основы защиты информации в современных информационных системах: учебное пособие. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. – 175 с.
7. Мартынова И.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Система пространственно-группового преобразования информационных потоков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2022. № 1. С.70-82.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АТАК НА СИСТЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Лушкина Н.М.
Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в г. Саров

Современные системы искусственного интеллекта (ИИ) становятся неотъемлемой частью критически важной инфраструктуры. Модели ИИ внедряются в автономные транспортные средства, управление промышленными предприятиями, системы медицинской диагностики и военные технологии. Вместе с расширением областей применения растёт и поверхность атак на эти системы. Специфика таких нападений заключается в возможности манипулирования логикой вычислительной модели и данными датасетов, что отличает их от классических кибератак [1].

Исследования последних лет показывают, что нейросетевые модели обладают фундаментальными уязвимостями, которые могут быть описаны и проанализированы с помощью математического аппарата. Понимание математической структуры атак позволяет не только оценивать существующие риски, но и разрабатывать эффективные стратегии защиты.

Цель настоящего доклада – проанализировать подходы к оценке уязвимостей и перспективные направления защиты.

Анализ современной литературы позволяет выделить три основные категории атак на системы ИИ в зависимости от этапа жизненного цикла модели и метода воздействия [2, 3].

Состязательные атаки представляют собой наиболее изученный класс угроз. Они реализуются посредством подачи на вход системы специально подготовленных (состязательных) данных, на основе которых модель принимает неправильные решения. Эти атаки работают путём введения тонких, часто незаметных для человеческого наблюдателя возмущений в входные данные. Хотя эти изменения кажутся случайными, они используют определённые математические уязвимости в границах принятия решений высокоразмерных нейронных сетей.

В зависимости от уровня доступа злоумышленника к целевой системе состязательные атаки делятся на:

- атаки «белого ящика» – злоумышленник имеет полную прозрачность архитектуры модели, градиентов и весов. Это позволяет ему математически вычислить наиболее эффективное возмущение, часто с использованием таких методов, как метод быстрого знака градиента (FGSM);

- атаки «чёрного ящика» – злоумышленник не знает внутренних параметров модели и может наблюдать только входы и выходы. В таких случаях злоумышленники часто используют «замещающую модель» для генерации состязательных примеров, которые эффективно переносятся в целевую систему.

Атаки отравления направлены на этап обучения модели. Злоумышленник внедряет вредоносные данные в обучающую выборку, что приводит к некорректному формированию модели. Построена корректная модель отравления обучающей выборки, позволяющая реализовать уязвимость и триггеры для ошибок классификации. Простейший характер построенной модели функционирования и формирования обмана позволяет считать, что причинно-следственная логика работы возможной реальной атаки восстановлена правильно.

С появлением больших языковых моделей возник новый класс атак, связанных с манипулированием контекстом и цепочками рассуждений. Разработаны методы, позволяющие внедрять инструкции прямо в цепочку рассуждений модели и заставлять её генерировать запрещённый контент. Исследователи также обнаружили, что ИИ-модели могут незаметно перенимать вредоносные установки из бессмысленных данных.

Математические модели атак/

Классическая состязательная атака может быть сформулирована как задача оптимизации. Пусть $f: R^d \rightarrow R^k$ – функция классификации, $x \in R^d$ – исходный входной объект с истинной меткой y. Цель атаки – найти минимальное возмущение δ такое, что:

$\min||\delta||_p$ s.t. $\arg\max_i f_i(x+\delta) \neq y$ при $x+\delta \in [0,1]^d$

где $|\cdot|_p$ – норма L_p (чаще всего L_2 или L_∞), ограничивающая амплитуду возмущения. Это базовое представление лежит в основе многих методов генерации состязательных примеров.

Предложен подход к моделированию атак на системы искусственного интеллекта с использованием марковских процессов принятия решений (МППР). Предлагается многоуровневый подход к интерпретации состояний системы, включающий несколько этапов детализации состояний.

Математическая постановка МППР для моделирования атаки:

Марковский процесс принятия решений задаётся кортежем {S, A, P, R, γ}, где:

S – конечное множество состояний системы ИИ;

A – конечное множество действий злоумышленника;

P(s'|s,a) – вероятности перехода между состояниями;

R(s,a) – функция награды (например, успех атаки);

$\gamma \in [0,1]$ – коэффициент дисконтирования.

При формировании вектора атаки учитывается специфика модели нарушителя и рассматриваются два основных режима моделирования: on-time и off-time. Описывается порядок формирования наград на абстрактном уровне (без конкретизации действий злоумышленника). Такой подход позволяет моделировать сложные многошаговые атаки с учётом вероятностных переходов между состояниями.

Для прогнозирования распространения атак разработана методология адаптации модернизированных SIR-моделей природных эпидемий для выявления подобия и аналогов в характере распространения деструктивных сбоев в системах ИИ, вызванных разнородно-массовыми и таргетированными воздействиями.

Классическая SIR-модель описывается системой дифференциальных уравнений:

$dS/dt = -\beta SI$

$dI/dt = \beta SI - \gamma I$

$dR/dt = \gamma I$

В контексте атак на системы ИИ переменные интерпретируются следующим образом:

S – доля незатронутых (устойчивых) компонентов системы ИИ;

I – доля поражённых (скомпрометированных) компонентов;

R – доля восстановленных (изолированных) компонентов;

β – скорость распространения атаки;

γ – скорость восстановления.

Разработанная оригинальная модель угроз информационной безопасности техническим компонентам искусственного интеллекта в условиях разнородно массовых компьютерных атак отображает уязвимые места и способы возможных действий злоумышленников. Выявленные закономерности позволили оценить риски возможного ущерба целостности и разработать эффективные стратегии предотвращения и исправления искажений моделей машинного обучения [4, 5].

Разработан новый подход атаки на нейронные сети на основе перцептрона с кусочно-линейными функциями активации с использованием базовой линейной алгебры. Атака формулируется как система линейных уравнений и неравенств и демонстрирует упрощённый и эффективный в вычислительном отношении подход к созданию разнообразных наборов состязательных примеров.

Пусть нейронная сеть с L слоями описывается рекуррентным соотношением:

$x^{(l)} = \sigma^{(l)}(W^{(l)}x^{(l-1)} + b^{(l)})$, $l=1,\ldots,L$.

Для кусочно-линейных функций активации (ReLU) существуют области, в которых сеть ведёт себя как линейная система. SLAP-атака находит состязательное возмущение δ, решая систему: $W_{eff}(x + \delta) + b_{eff}$ целевая область.

Исследование подчёркивает серьёзную проблему, которую представляет предлагаемая методология атаки для современной защиты нейронных сетей, указывая на острую необходимость в инновационных стратегиях защиты.

Универсальная модель атаки уклонения предназначена для генерации таргетированных атак на бинарные классификаторы в областях с нелинейными ограничениями. В качестве внутренних компонентов двух вариантов модели атаки используются алгоритмы оптимизации GD (градиентный спуск) и Adam (адаптивное оценивание моментов).

Атака формулируется как решение оптимизационной задачи:

$\min_{\delta \in C} L(f(x\delta), y_{target}) + \lambda Reg(\delta)$

где C – множество допустимых возмущений (нелинейные ограничения), L – функция потерь, а Reg(δ) – регуляризатор, контролирующий амплитуду и незаметность возмущения.

Достигнутые результаты показывают, что новая универсальная модель атаки эффективно генерирует таргетированные атаки, используя алгоритмы оптимизации GD и Adam. Модель была оценена с помощью экспериментального анализа, что продемонстрировало её потенциал в контексте кибербезопасности.

Математические модели оценки уязвимостей.

Модели контроля защищённости на основе математической статистики используют для контроля защищённости систем информационного обмена объектов критической информационной инфраструктуры случайные кибератаки, которые являются основополагающим элементом процесса обучения нейронной сети.

Ключевые положения подхода:

- обосновывается необходимость выявления случайных кибератак до выхода параметров безопасности за пределы предупредительного допуска;
- для определения параметров безопасности целесообразно использовать характеристики внешних программных запросов;
- оптимизация нейросетевых моделей.

Модель оценки рисков на основе SIR-прогнозирования позволяет оценивать риски возможного ущерба целостности моделей машинного обучения. Выявленные закономерности распространения деструктивных сбоев дают возможность прогнозировать масштаб угроз и разрабатывать эффективные стратегии предотвращения и исправления искажений моделей.

Подход MITRE ATLAS и многоуровневая детализация – это многоуровневый подход к интерпретации состояний системы, который включает несколько этапов детализации и основан на методологии MITRE ATLAS. Это позволяет системно подходить к анализу уязвимостей на различных уровнях абстракции – от конкретных технических действий до стратегических тактик злоумышленника.

Проведенные исследования показали, что существует ряд основных подходов к защите и повышению устойчивости.

Методы защиты от состязательных атак связаны с методами защиты моделей глубоких нейронных сетей от угроз, связанных с состязательными атаками. Наиболее эффективным подходом к созданию средств защиты признано использование состязательного обучения, когда модель обучается на смеси чистых и состязательных примеров, что повышает её устойчивость к подобным атакам.

Теоретико-игровые модели защиты используют модель защиты объектов от множественных воздействий. Рассматривается игра защиты с нулевой суммой, в которой атакующий может нанести несколько ударов по точкам защиты, чтобы максимизировать ущерб. Математическая формулировка: пусть n – количество точек защиты, m – количество ударов атакующего. Защитник распределяет ресурсы x_1 , …, x_n (Σ x_i = 1) по точкам защиты. Атакующий выбирает m целей j_1, …, j_m (с возможными повторениями). Платёж (ущерб) определяется функцией $U(x_{j1},…, x_{jm})$. Решение задачи сводится к нахождению равновесия по Нэшу в смешанных стратегиях.

Обнаружение атак с помощью математической статистики –это подход к обнаружению атак, оптимизированных по L_0-норме, на нейронные сети обработки изображений с использованием средств математической статистики. Подход может быть использован для обнаружения изображений, содержащих состязательные возмущения.

Повышение устойчивости с использованием обобщения – это математическая модель, интегрирующая состязательную адаптацию домена в архитектуры нейронных сетей, предлагая улучшенную устойчивость и возможности обобщения. Этот подход особенно актуален для сценариев, где модель может столкнуться с данными, распределение которых отличается от обучающего.

Несмотря на значительный прогресс в математическом моделировании атак на системы ИИ, существует ряд фундаментальных проблем и ограничений.

Многие современные нейросетевые модели остаются «чёрными ящиками», что затрудняет формальное доказательство их устойчивости к определённым классам атак. Как отмечается в исследовании, понимание того, как функционируют уязвимости, имеет важное значение для разработки надёжных протоколов безопасности ИИ и механизмов защиты.

Марковские процессы принятия решений при увеличении числа состояний и действий (особенно при моделировании сложных многошаговых атак на большие модели) сталкиваются с проблемой «проклятия размерности». Это ограничивает практическую применимость точных методов для современных LLM [6, 7].

Калибровка параметров β и γ в SIR-моделях требует статистических данных о реальных атаках, которые часто являются конфиденциальными или недоступными для исследователей.

Как показано в исследовании IEEE 2024, традиционные методы атак могут быть неэффективны в областях со сложными нелинейными ограничениями. Разработка моделей, учитывающих такие ограничения, остаётся актуальной задачей.

Исследования показывают, что состязательные примеры, сгенерированные для одной модели, могут быть эффективны против моделей с совершенно другой архитектурой, что подчёркивает фундаментальный характер уязвимостей нейронных сетей.

Анализ современного состояния области позволяет выделить несколько перспективных направлений дальнейших исследований [8-11]:

- интеграция методов машинного обучения и формальной верификации: разработка гибридных подходов, сочетающих эмпирические методы обнаружения атак с формальными методами верификации устойчивости моделей, может обеспечить более надёжную защиту;
- развитие квантово-устойчивых моделей ИИ: в связи с развитием квантовых вычислений возникает необходимость в разработке моделей ИИ, устойчивых к квантовым атакам. Это требует создания новых математических моделей, учитывающих возможности квантовых алгоритмов;
- создание унифицированных фреймворков оценки уязвимостей: на основе методологии MITRE ATLAS и российских стандартов (ФСТЭК) целесообразно разработать единый фреймворк для количественной оценки уязвимостей систем ИИ с использованием математического аппарата;
- исследование атак на генеративные модели: по мере распространения генеративных моделей (GAN, диффузионные модели, LLM) возникает необходимость в математическом моделировании атак, направленных на манипуляцию генерируемым контентом;
- разработка российских импортонезависимых решений: создание отечественных математических моделей и программных комплексов для анализа устойчивости систем ИИ к атакам с учётом российской специфики и требований импортозамещения является приоритетной задачей.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Математическое моделирование атак на системы ИИ является активно развивающейся областью, объединяющей методы оптимизации, теории вероятностей, дифференциальных

уравнений, марковских процессов и теории игр. Это обеспечивает формальную основу для понимания фундаментальных уязвимостей нейросетевых моделей.

2. Основные классы математических моделей включают: оптимизационные задачи для состязательных атак уклонения; марковские процессы принятия решений для моделирования многошаговых атак; SIR-модели для прогнозирования распространения деструктивных воздействий; системы линейных уравнений и неравенств (SLAP) для атак на персептроны.

3. Оценка уязвимостей требует комплексного подхода, сочетающего методы математической статистики, SIR-прогнозирования и многоуровневой детализации на основе MITRE ATLAS.

4. Защита от атак базируется на методах состязательного обучения, теоретико-игровых моделях распределения ресурсов и статистическом обнаружении аномалий. Наиболее эффективным подходом признано состязательное обучение.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию методов формальной верификации, развитие квантово-устойчивых моделей, создание унифицированных программных средств оценки уязвимостей и разработку отечественных импортонезависимых решений.

Понимание математической природы атак на системы искусственного интеллекта является необходимым условием для создания действительно надёжных и заслуживающих доверия систем ИИ, особенно в критически важных областях применения. Всестороннее изучение состязательных уязвимостей способствует повышению состязательной устойчивости машинного обучения, открывая путь для разработки более надёжных и заслуживающих доверия систем искусственного интеллекта в реальных приложениях.

Список литературы:

1. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
2. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
3. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
4. Перминов А. И. SLAP – простая линейная атака на персептрон // Труды ИСП РАН. – 2024. – Т. 36, вып. 3. – С. 83-92. DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(3)-6.
5. Грушо А. А., Грушо Н. А., Забежайло М. И., Писковский В. О., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я. Логика обмана в машинном обучении // Информатика и её применения. – 2024. – Т. 18, № 1. – С. 78-83. DOI: 10.14357/19922264240111.
6. Evasion attacks on ML in domains with nonlinear constraints // 2024 IEEE Conference on Communications and Network Security. – 2024. DOI: 10.1109/CNS62441.2024.10707402.
7. Состязательные атаки в машинном обучении // Ultralytics. – 2026.
8. Баев А. В., Самонов А. В., Сафонов В. М., Краснов С. В., Малышев С. Р. Методы защиты моделей нейронных сетей от состязательных атак уклонения и отравления // Автоматизация процессов управления. – 2024. – № 4 (78).
9. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
10. Model for protecting objects from multiple impacts // Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics. – 2025.
11. Features of using Markov decision-making processes when modeling attacks on artificial intelligence systems // Vestnik SamU. Estestvenno-Nauchnaya Ser. – 2024. – Vol. 30, No. 4. – P. 147-160.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В БОРЬБЕ С ХАКЕРСКИМИ АТАКАМИ

Комаров О.М., Тюхтин А.А., Мартынов А.П.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Традиционные сигнатурные методы обнаружения вторжений, основанные на статических правилах и известных сигнатурах, демонстрируют заметные провалы по эффективности при обнаружении нестандартных атак, а также атак нулевого дня. В условиях, когда количество атак на российские компании выросло более чем на 150%, классические подходы к защите становятся всё менее эффективными.

В этих условиях нейросетевые технологии выходят на первый план благодаря своим возможностям обнаруживать неочевидные и скрытые закономерности, а также быстро адаптироваться к изменениям в параметрах атак. ФСТЭК России также актуализировала рекомендации относительно анализа сетевого трафика, согласившись с необходимостью внедрения систем анализа, руководствующихся интеллектуальным анализом для защиты информационных ресурсов [1].

Цель настоящего доклада – систематизировать современные подходы к применению нейросетевых технологий в задачах защиты от хакерских атак, проанализировать их эффективность и ограничения, а также определить перспективные направления развития.

Современные нейросетевые технологии применяются для решения широкого спектра задач в области информационной безопасности. К числу ключевых задач, решаемых с помощью нейросетей, относятся:

- обнаружение аномалий в сетевом трафике – выявление отклонений от нормального поведения, которые могут свидетельствовать о вторжении;
- предотвращение распределённых атак типа DDoS – классификация и фильтрация вредоносного трафика в реальном времени;
- классификация вредоносного программного обеспечения – идентификация известных и неизвестных образцов вредоносного ПО;
- прогнозирование новых киберугроз – анализ исторических данных для предсказания будущих векторов атак;
- контроль уязвимостей – автоматизированное выявление и управление уязвимостями в ИТ-инфраструктуре.

Современные нейросетевые архитектуры обладают значительным потенциалом для революционного преобразования систем информационной безопасности. Ключевыми преимуществами нейросетевых подходов являются сверхвысокая скорость обработки потоковых данных, способность детектировать ранее неизвестные типы атак благодаря выявлению сложных корреляций, а также возможность прогнозирования угроз на основе анализа исторических данных [2].

Анализ современных исследований позволяет выделить несколько ключевых архитектур нейронных сетей, применяемых для защиты от хакерских атак.

Рекуррентные нейронные сети и сети долгой краткосрочной памяти наиболее эффективны для анализа последовательных данных, таких как временные ряды сетевого трафика и последовательности событий безопасности. Их способность сохранять информацию о предыдущих состояниях делает их идеальными для обнаружения атак, развивающихся во времени.

Свёрточные нейронные сети демонстрируют высокую эффективность при анализе сетевого трафика, представленного в виде последовательностей пакетов или потоков. Подобные сети способны автоматически выделять локальные паттерны, характерные для различных типов атак, без необходимости ручного проектирования признаков.

Графовые нейронные сети представляют собой относительно новое, но быстро развивающееся направление в области кибербезопасности. Рассматриваются различные методы и подходы применения графовых нейронных сетей в системах обнаружения вторжений.

Особый интерес представляет гибридный подход, сочетающий федеративное обучение с графовыми нейронными сетями. Исследователи предлагают федеративную ансамблевую сеть на основе графов в качестве нового подхода к обнаружению аномалий, который повышает эффективность обнаружения при минимизации ложных срабатываний. Этот подход особенно актуален для распределённых систем, где данные не могут быть централизованы по соображениям конфиденциальности [3, 4].

Карты Кохонена представляют собой тип нейронных сетей, использующих обучение без учителя для кластеризации и визуализации многомерных данных. Предложен метод мониторинга промышленных систем на основе нейросетевой модели с использованием нейросети Кохонена. Ключевое преимущество подхода заключается в способности нейросети

Кохонена работать с большими данными, когда показаний много и они сложно связаны между собой. Классические алгоритмы часто не справляются с такими объёмами и сложностью. Работа модели состоит из двух этапов: сначала она анализирует показания всех датчиков в штатном режиме, создавая карту типичных состояний, а затем переходит в режим постоянного мониторинга, сравнивая новые поступающие данные с эталонной картиной. Эффективность модели подтверждена тестами: система правильно классифицировала 94% данных.

Архитектура трансформеров, основанная на механизмах внимания, демонстрирует впечатляющие результаты в задачах обработки последовательных данных. В контексте кибербезопасности трансформеры применяются для анализа сетевого трафика и обнаружения сложных атак.

Обнаружение аномалий в сетевом трафике является одной из наиболее активно разрабатываемых областей применения нейросетей в кибербезопасности. Существующие сигнатурные подходы неспособны справляться с новыми типами атак, особенно тех, которые используют полиморфные вредоносные программы, эксплуатируют уязвимости нулевого дня или применяют скрытные методы проникновения.

Промышленные комплексы представляют собой сложные системы с десятками датчиков, отслеживающих различные параметры. Человеческому оператору сложно непрерывно контролировать все эти данные и своевременно обнаруживать отклонения, которые могут сигнализировать о поломке или кибератаке. В случае успешной атаки преступник может подменить технологическую информацию в системе, что способно привести к некорректной работе. Применяемая нейронная сеть находит скрытые закономерности и паттерны в поведении технологических данных без заранее заданных человеком правил. В перспективе система сможет не только обнаруживать, но и классифицировать тип кибератаки [5, 6].

Парадоксальным образом сами системы искусственного интеллекта также нуждаются в защите от кибератак. В России была создана первая система защиты ИИ от кибератак. Система отражает 70% популярных уязвимостей, включая промпт-инъекции, утечки конфиденциальных данных, злоупотребление LLM-агентами и другие угрозы, и совместима с любыми ИИ-моделями. Она блокирует вредоносные запросы с точностью 97%, предотвращая утечки данных, некорректную обработку входных данных, перегрузку вычислительных ресурсов и другие уязвимости. Система работает как промежуточный фильтр: каждый запрос анализируется перед отправкой в веб-приложение.

Уязвимости в программном обеспечении – один из самых распространённых векторов проникновения в ИТ-инфраструктуру. Автоматизированные решения на базе искусственного интеллекта помогают организациям выявлять, оценивать и устранять слабые места в системах до того, как они будут использованы злоумышленниками. ИИ-инструменты помогают видеть больше там, где классические методы анализа работают плохо или не работают вовсе. Например, ИИ-функционал способен "понимать" контекст переписки и "намеки", указывающие на потенциальное нарушение правил безопасности. Однако искусственный интеллект пока не заменит человека в принятии решений – он призван улучшать процессы, а не руководить ими.

Важно понимать, что сами нейросетевые модели уязвимы для специализированных атак. Серьёзные технологические вызовы включают чрезмерную потребность в вычислительных ресурсах для обучения сложных моделей, проблему "черного ящика" при интерпретации решений, уязвимость самих нейросетевых моделей к специализированным атакам, а также этические аспекты автоматизированного принятия решений в кибербезопасности [7].

Атаки уклонения представляют собой класс атак, при которых вредоносные входные данные модифицируются таким образом, чтобы вызвать неверную классификацию со стороны модели машинного обучения. Разработан метод, использующий обучение с подкреплением для манипуляции атакующими потоками с целью имитации легитимного трафика и уклонения от обнаружения.

Экспериментальные результаты демонстрируют, что данный метод позволяет осуществлять как грубые, так и скрытные атаки, обходя 6 существующих методов обнаружения в 80 сценариях атак, достигая более 96,65% успешных атак. Особенно важно, что разработанный метод может обходить методы, которые являются эмпирически или сертифицированно устойчивыми к существующим атакам уклонения, и достигает низкой задержки генерации состязательного трафика, что демонстрирует его практичность в реальных сценариях.

Атаки типа «бэкдор» представляют собой ещё один класс угроз, при котором злоумышленник внедряет скрытые триггеры в модель во время её обучения. При активации этих триггеров модель ведёт себя нештатным образом, сохраняя при этом нормальное поведение на обычных данных.

Перспективным направлением является интеграция нейросетевых систем защиты с постквантовой криптографией. Исследователи разрабатывают практическую многоуровневую систему, интегрирующую несколько постквантовых криптографических примитивов для защиты глубокого обучения в распределённых средах. Система обеспечивает квантовую устойчивость уровня NIST Level 3 для сквозной безопасности моделей.

Развитие гибридных подходов, сочетающих различные архитектуры нейронных сетей, а также их комбинации с классическими методами обнаружения, позволяет достичь более высокой точности и устойчивости к обходу. Особый интерес представляют федеративные ансамблевые сети на основе графов, которые повышают эффективность обнаружения при минимизации ложных срабатываний [8-10].

Разработка методов объяснимого ИИ для задач кибербезопасности является критически важным направлением. Понимание того, почему нейросетевая модель приняла то или иное решение, необходимо для доверия к автоматизированным системам защиты, особенно при расследовании инцидентов и в судебных разбирательствах. Исследователи выделяют создание методов объяснимого ИИ для безопасности как одно из перспективных направлений дальнейших исследований.

Развитие адаптивных систем, способных эволюционировать вместе с киберугрозами, является ещё одним перспективным направлением. Такие системы должны не только обучаться на исторических данных, но и непрерывно адаптироваться к новым типам атак в реальном времени без необходимости полного переобучения.

Несмотря на значительный прогресс, применение нейросетевых технологий в кибербезопасности сталкивается с рядом серьёзных проблем:

1. Вычислительные ресурсы. Обучение сложных нейросетевых моделей требует значительных вычислительных мощностей, что может быть недоступно для небольших организаций.

2. Проблема «чёрного ящика». Интерпретируемость решений нейросетей остаётся сложной задачей, что затрудняет понимание причин срабатывания системы и может приводить к ложным выводам при расследовании инцидентов.

3. Уязвимость к состязательным атакам. Как было показано выше, сами нейросетевые модели могут быть скомпрометированы специализированными атаками.

4. Качество и репрезентативность данных. Эффективность нейросетевых моделей напрямую зависит от качества и полноты обучающих данных. Отсутствие данных о редких типах атак может привести к пропуску критических угроз.

5. Этические аспекты. Автоматизированное принятие решений в кибербезопасности поднимает вопросы ответственности за ложные срабатывания и возможные последствия блокировки легитимного трафика.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы [11-14]:

1. Нейросетевые технологии становятся ключевым инструментом в борьбе с современными киберугрозами, особенно в условиях роста числа атак и усложнения их методов. Способность нейросетей выявлять скрытые закономерности и адаптироваться к новым типам атак делает их незаменимыми для обнаружения аномалий, классификации вредоносного ПО и прогнозирования угроз.

2. Различные архитектуры нейронных сетей – рекуррентные, свёрточные, графовые, самоорганизующиеся карты Кохонена и трансформеры – находят своё применение в зависимости от специфики решаемой задачи, демонстрируя высокую эффективность (точность до 99,79% в задачах обнаружения вторжений).

3. Существует серьёзная проблема уязвимости самих нейросетевых моделей к специализированным атакам, что требует разработки дополнительных механизмов защиты и методов повышения устойчивости.

4. Российские разработки в области нейросетевой защиты демонстрируют конкурентоспособный уровень и успешно внедряются на промышленных объектах и в корпоративной среде.

5. Перспективные направления включают интеграцию нейросетевых систем с постквантовой криптографией, развитие гибридных и ансамблевых моделей, создание

объяснимого ИИ для безопасности и разработку адаптивных систем, эволюционирующих вместе с угрозами.

Таким образом, нейросетевые технологии представляют собой не только мощный инструмент для защиты от хакерских атак, но и активно развивающуюся область, требующую дальнейших исследований для преодоления существующих ограничений и повышения надёжности систем информационной безопасности.

Список литературы:

1. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
2. Волков К.О., Мартынов А.П., Марунин М.В., Николаев Д.Б. Аналитические исследования характеристик информационной составляющей автоматизированных систем управления и контроля: Учеб.-метод. Пособие. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2017. – 197 с.
3. Подгруппы симметрических групп подстановок ряда факториальных множеств / А.П. Мартынов, И.А. Мартынова, Д.Б. Николаев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 1. – С. 53-62.
4. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
5. Графовые нейронные сети в борьбе с кибератаками: новый подход к обнаружению вторжений // Сибирский федеральный университет. – 2025.
6. Казанцев А.А., Макаров И.С., Райков А.В. и др. Применение нейросетей для анализа больших данных в реальном времени // Программные системы и вычислительные методы. – 2025. – № 2. – С. 132-147.
7. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
8. В России создали систему защиты ИИ от кибератак // Компьютерра. – 07.08.2025.
9. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
10. Liu Z., Zhao Y., Liu Z., Li Q., Fu C., Zhou G., Xu K. A Hard-Label Black-Box Evasion Attack against ML-based Malicious Traffic Detection Systems // arXiv:2510.14906. – 2025.
11. A practical multi-layered framework for post-quantum secure machine learning // ScienceDirect. – 2025.
12. «Лаборатория Касперского» и Сбер применят мультиагентную AI-функциональность для автоматического поиска и управления уязвимостями // Kaspersky. – 24.09.2025.
13. «СёрчИнформ» представила на ТБ Форуме опыт применения ИИ для защиты конфиденциальных данных // СёрчИнформ. – 24.02.2026.
14. Киберизоляция страны, естественный отбор в эпоху ИИ и проблема времени // IT-World. – 30.01.2026.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СЦЕНКИ СТОЙКОСТИ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОТОКОЛОВ В УСЛОВИЯХ КВАНТОВЫХ УГРОЗ

Кащеев В.М., Соколова Я.В.

ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Современная криптография находится на пороге фундаментальной трансформации. Развитие квантовых вычислений создает экзистенциальную угрозу для большинства классических криптосистем. Алгоритм Шора способен решать задачи факторизации и дискретного логарифмирования за полиномиальное время, что делает уязвимыми такие широко распространённые схемы, как RSA и ECC. Одновременно с этим алгоритм Гровера позволяет ускорить перебор ключей в симметричных криптосистемах, снижая их эффективную стойкость вдвое.

Однако сама по себе квантовая угроза носит вероятностный характер. Создание криптографически значимого квантового компьютера (CRQC) не является детерминированным

событием – это процесс, сроки наступления которого остаются неопределёнными. Более того, появление новых квантовых алгоритмов или совершенствование существующих может кардинально изменить ландшафт угроз. В связи с этим возникает необходимость в математических методах, способных количественно оценивать стойкость криптографических протоколов в условиях квантовой неопределённости [1].

Цель настоящего доклада – проанализировать современные вероятностные модели и методы, применяемые для оценки стойкости криптографических протоколов перед лицом квантовых угроз.

Классический подход к оценке стойкости, рассматривающий криптосистему как бинарную («безопасная/скомпрометированная»), не отражает динамики квантовой угрозы [2]. Требуется переход к вероятностным моделям, учитывающим фактор времени и неопределённости. Один из таких подходов – это вероятностная многоуровневая модель, объединяющая три ключевых компонента:

1. Модель деградации. Использует аналогию с термодинамическим распадом для прогнозирования постепенной эрозии криптографической безопасности под воздействием квантовых угроз. Параметры модели калибруются на основе текущих оценок прогресса в области квантовых вычислений.

2. Скрытые марковские модели (HMM). Позволяют моделировать вероятностные переходы между различными состояниями безопасности системы. HMM фиксирует не только наблюдаемые события (например, появление нового квантового алгоритма), но и скрытые изменения, такие как стратегические сдвиги в разработках злоумышленников.

3. Адаптация финансового опционного ценообразования. Третий компонент переводит технические траектории в стимулы для миграции на постквантовые стандарты, используя модель, аналогичную оценке опционов в финансах. Это позволяет количественно оценить выгоду от раннего перехода на новые стандарты и обосновать принятие решений в условиях неопределённости.

Для конкретных постквантовых алгоритмов вероятностный анализ становится критическим инструментом для проверки их соответствия заявленным уровням безопасности. Наиболее яркий пример – вероятностное моделирование криптосистемы CRYSTALS-Kyber, стандартизированной NIST как ML-KEM (FIPS 203).

Вероятность ошибки дешифрования. Основной угрозой для Kyber является не столько атака на математическую задачу, сколько малая, но ненулевая вероятность некорректной расшифровки. Разработана гибридная аналитико-вычислительная модель для оценки вероятности ошибки дешифрования (DFP). Модель комбинирует точное вычисление хвостов распределения центрированного биномиального шума Kyber с использованием FFT-свёртки и сравнение с классическими концентрационными неравенствами (Хёфдинга, Бернштейна). Результат показывает, что неравенства Бернштейна систематически переоценивают риск по сравнению с точными вероятностными хвостами на несколько порядков. Это важное наблюдение уточняет количественные запасы безопасности, заложенные в конструкцию Kyber, и позволяет дать более реалистичную оценку его стойкости.

Анализ для реальных открытых ключей. Проведенные исследования дают строгий математический анализ фактической вероятности отказа Kyber для конкретных открытых ключей. Показано, что для Kyber-512 и Kyber-768 оценки из оригинальной спецификации являются консервативными. Однако для Kyber-1024 вероятность отказа некоторых открытых ключей может быть хуже заявленной. Это открывает возможность для селективной генерации ключей в практических приложениях [3, 4].

Системы квантового распределения ключей (КРК), такие как протокол BB84, обеспечивают теоретико-информационную стойкость, основанную на фундаментальных законах квантовой физики. Однако и здесь вероятностные методы играют ключевую роль в доказательствах безопасности. Стойкость КРК базируется не только на детектировании атак на квантовые состояния, но и на обеспечении целостности классических сообщений, передаваемых по вспомогательному каналу. Для детектирования вторжений используется процедура аутентификации. В данной работе впервые простыми средствами решён вопрос о связи между абстрактным критерием стойкости КРК с теоретико-информационной аутентификацией и сложностью поиска квантовых ключей. Теоретико-информационная аутентификация гарантирует обнаружение вторжений независимо от вычислительных возможностей нарушителя, включая квантовый вычислитель.

Принципиально новый уровень анализа связан с оценкой стойкости не отдельных алгоритмов, а реальных протоколов, комбинирующих классические и постквантовые компоненты. Классический пример – протокол PQXDH (Post-Quantum Extended Diffie-Hellman), развёрнутый для защиты от атак типа "собрать сейчас, расшифровать позже" [5]. Анализ безопасности PQXDH показывает:

- используется редукционный анализ в теоретико-игровой модели безопасности, формализованной на языке игр;
- модель учитывает возможность компрометации различных типов ключевого материала (долгосрочного, полустатического, эпизодического);
- полностью устанавливаются параметризованные, конкретные границы безопасности для классической и постквантовой стойкости сеансовых ключей PQXDH;
- Kyber и ML-KEM удовлетворяют новому свойству связывания, необходимому для доказательства безопасности протокола.

Несмотря на значительный прогресс, существуют серьёзные ограничения в применимости рассмотренных методов:

1. Расхождение между математической моделью и реальной реализацией. Всё большее признание получает позиция, что теоретическая безопасность PQC-алгоритмов недостаточна без тщательного тестирования их реальных реализаций с использованием методов анализа по сторонним каналам, инжекции ошибок и фаззинга протоколов [6, 7].
2. Валидность предположений о независимости. Анализ Kyber показал, что предположение о независимости ошибок в оригинальной спецификации не является строгим. Результаты для Kyber-1024 показали, что для некоторых ключей вероятность отказа может быть хуже заявленной.
3. Адаптивная безопасность. Статическая безопасность часто оказывается недостаточной в реальных сценариях. Разрабатываются методы повышения адаптивной безопасности постквантовых схем, например, GRASS+.

Перспективные направления развития:

Интеграция с машинным обучением. Глубокое обучение может применяться для прогнозирования состояний криптосистем, выявления скрытых закономерностей и построения более точных вероятностных моделей.

Постквантовая миграция. Ключевая практическая задача – разработка методологий миграции на основе вероятностных оценок. Это позволяет сформировать рациональные дорожные карты перехода на постквантовые стандарты [8].

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Вероятностные модели становятся ключевым инструментом для оценки стойкости криптографических протоколов в условиях квантовых угроз, позволяя перейти от бинарных к количественным и динамическим оценкам.
2. Методы вероятностного анализа включают многоуровневые модели на основе HMM и опционного ценообразования для прогнозирования деградации, модели DFP для оценки Kyber, теоретико-информационный анализ для КРК и редукционный анализ для реальных протоколов.
3. Требуется сочетание математического моделирования, теоретико-информационного подхода и анализа реальных реализаций для обеспечения всесторонней оценки безопасности.
4. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку унифицированных моделей оценки квантовой стойкости, интеграцию с методами машинного обучения и создание импортонезависимых решений для критической инфраструктуры России.

Список литературы:

1. A Probabilistic Framework for Forecasting Cryptographic Security Under Quantum and Classical Threats // Symmetry. 2026. Vol. 18, No. 2. Article 297.
2. Грибунин В.Г., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Криптография и безопасность цифровых систем: Учебное пособие. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2011. 411 с.
3. Yavas C.E., Chen L., Kadlec C. Probabilistic modeling of decryption-failure bounds in CRYSTALS-Kyber under the post-quantum threat model // Machine Learning: Science and Technology. 2026. Vol. 7. 015033.
4. Tight Analysis of Decryption Failure Probability of Kyber in Reality // Information and Communications Security. 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-15777-6_9.

5. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
6. Security Analysis of Signal's PQXDH Handshake. IBM Research. PKC 2025.
7. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
8. Scientific approach to probabilistic assessment of information protection against imposing false messages in telecommunication systems. 2022. DOI: 10.30837/rt.2022.1.208.01.

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ

Иванов Н.С.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

В условиях цифровой трансформации и усложнения технических систем проблема защиты информации от утечки по техническим каналам приобретает критическое значение. Наряду с традиционными угрозами (несанкционированный доступ, вредоносное ПО), существуют каналы, обусловленные физическими принципами работы электронного оборудования: побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН), акустоэлектрические преобразования, виброакустические сигналы и др. Эти каналы сложно обнаружить и контролировать, особенно в условиях плотной компоновки современной аппаратуры [1].

Существующие методы и средства выявления каналов утечки, как правило, ориентированы на решение частных задач: поиск закладных устройств, контроль защищённости помещений от перехвата, сертификационные испытания. Они требуют участия квалифицированного персонала, дорогостоящего оборудования и не обеспечивают непрерывного мониторинга. Кроме того, они не позволяют прогнозировать возникновение новых каналов при изменении конфигурации системы или внешних условий.

Целью настоящей работы является обоснование концепции универсальной системы, способной в автоматическом режиме выявлять существующие каналы утечки и прогнозировать потенциальные риски, возникающие при функционировании сложных технических систем. Такая система должна базироваться на комплексном подходе, объединяющем измерения, моделирование и интеллектуальный анализ данных [2, 3].

Технические каналы утечки информации (ТКУИ) можно разделить на две основные группы:

- естественные (существующие) каналы – возникают за счёт физических полей и сигналов, сопровождающих работу аппаратуры. К ним относятся:

а) побочные электромагнитные излучения (ПЭМИ) – излучения на частотах работы генераторов, тактовых сигналов, модуляторов;

б) наводки (электромагнитные связи) – паразитные сигналы в цепях питания, заземления, линиях связи, возникающие за счёт взаимной индуктивности и ёмкости;

в) акустоэлектрические преобразования – модуляция электромагнитного поля звуковыми волнами;

г) виброакустические сигналы – механические колебания элементов конструкций, вызванные речевой активностью;

- искусственно создаваемые каналы – создаются злоумышленником путём воздействия на систему внешними полями с целью модуляции информационного сигнала (высокочастотное навязывание, «микрофонный эффект» в полупроводниковых приборах и т.п.). Особую опасность представляют непреднамеренные каналы, которые могут возникать при совместной работе различных устройств в составе одной системы (например, взаимное влияние блоков, нелинейные эффекты в соединительных кабелях). Прогнозирование таких каналов требует учёта топологии системы, характеристик компонентов и электромагнитной обстановки.

Традиционно контроль защищённости от утечки по техническим каналам осуществляется с помощью измерительных комплексов [4, 5]. Они включают в себя измерительные приёмники, антенны, пробники тока и напряжения, программное обеспечение для анализа спектров и демодуляции сигналов.

Основные недостатки существующих подходов:

- высокая трудоёмкость – измерения проводятся вручную оператором, требуют предварительной подготовки и интерпретации результатов;

- дискретность – контроль осуществляется эпизодически (при сертификации, после изменений), что не позволяет выявить внезапно возникшие каналы;

- ограниченная прогностическая способность – методы позволяют лишь зафиксировать наличие сигнала, но не предсказать его появление при изменении режимов или конфигурации;

- сложность обработки больших объёмов данных – современные системы генерируют терабайты спектральных данных, анализ которых человеком невозможен;

- отсутствие интеграции – результаты измерений часто не связаны с моделями системы и не используются для динамической оценки рисков.

Таким образом, актуальной является задача создания автоматизированной системы, способной в реальном времени отслеживать электромагнитную обстановку, классифицировать сигналы, выявлять информативные каналы и прогнозировать их возникновение на основе моделирования.

Предлагаемая система должна быть построена как интегрированный программно-аппаратный комплекс, выполняющий следующие функции:

- непрерывный сбор данных от распределённых датчиков (антенн, токовых пробников, датчиков поля);

- цифровая обработка сигналов для выделения признаков информативных излучений;

- идентификация источников сигналов и оценка их опасности;

- прогнозирование потенциальных каналов утечки на основе математической модели системы;

- формирование отчётов и рекомендаций по нейтрализации угроз.

В состав системы входят следующие подсистемы [6].

Подсистема сбора данных – многоканальный измерительный комплекс, включающий широкополосные антенны, токовые пробники для измерений в цепях питания и сигнальных линиях, датчики магнитного поля низких частот, а также датчики вибрации и акустики. Измерительные модули должны быть синхронизированы по времени и иметь возможность работы как в ближней, так и в дальней зоне.

Подсистема обработки сигналов – реализует цифровое преобразование (оцифровка с высоким разрешением, быстрое преобразование Фурье, спектральный анализ). На этом этапе выделяются параметры сигналов: несущие частоты, виды модуляции, уровни, длительность. Используются методы статистической обработки и фильтрации для подавления помех и шумов.

Подсистема идентификации и классификации – на основе сформированных признаков с применением методов машинного обучения (нейронные сети, метод опорных векторов) производится классификация сигналов. Обучающая выборка включает как заведомо опасные сигналы (тестовые генераторы, имитаторы закладок), так и шумовые излучения типовых узлов. Классификатор должен отличать информативные сигналы (речевые, цифровые потоки) от неинформативных (тактовые частоты, гармоники питания).

Подсистема моделирования и прогнозирования – ключевой элемент для оценки потенциальных каналов утечки. На основе исходной информации о топологии системы (расположение блоков, трассировка печатных плат, типы компонентов, экранирование) строится электромагнитная модель. Используются методы конечных элементов или моментов для расчёта распределения полей и наводок. Модель позволяет прогнозировать, какие узлы могут стать источниками опасных излучений при изменении частоты или режима работы. Кроме того, учитываются внешние воздействия, способные создавать искусственно создаваемые каналы.

Подсистема визуализации и управления – предоставляет оператору удобный интерфейс для отображения текущей обстановки, результатов классификации, прогнозных карт рисков. Позволяет настраивать параметры мониторинга, пороги тревог, формировать отчёты.

Прогнозирование основано на сочетании физического моделирования и анализа эмпирических данных. Вначале создаётся базовая электромагнитная модель системы, которая калибруется по результатам контрольных измерений. Затем модель используется для расчёта уровней излучений в различных режимах и при различных внешних условиях. Например, можно оценить, как изменится спектр излучения при увеличении тактовой частоты процессора или при подключении дополнительного периферийного устройства.

Для искусственно создаваемых каналов моделируется реакция системы на внешнее электромагнитное поле (например, от передатчика злоумышленника). С помощью методов анализа нелинейных цепей прогнозируется возникновение интермодуляционных составляющих, несущих информацию [7].

Машинное обучение применяется для уточнения модели на основе измерений. Нейросеть может обучаться предсказывать уровни излучений по известным параметрам компонентов и топологии, что позволяет быстро оценивать риски без проведения полномасштабного моделирования.

Одной из главных задач является автоматическое обнаружение сигналов, содержащих информацию. Традиционные детекторы (энергетические, корреляционные) часто дают ложные срабатывания из-за многообразия помех. Использование нейронных сетей позволяет достичь высокой точности.

Предлагается следующий алгоритм.

1. Формирование обучающей выборки – проводится серия измерений на стенде, содержащем типовые электронные узлы: микроконтроллеры, источники питания, интерфейсные преобразователи, модули беспроводной связи. Записываются спектрограммы и осциллограммы сигналов в различных режимах. Часть измерений проводится с имитацией информативных сигналов (например, передача текста по UART, воспроизведение речи через динамик).

2. Предобработка данных – вычисляются спектральные признаки: амплитудный спектр, базовые коэффициенты, вейвлет-преобразования, статистические моменты. Формируются векторы признаков для каждого временного окна.

3. Обучение классификатора – используются свёрточные нейронные сети (CNN) для обработки спектрограмм как изображений, а также рекуррентные сети (LSTM) для учёта временных зависимостей. Оцениваются метрики точности, полноты, F-мера.

4. Применение обученной модели – в реальном времени поток данных разбивается на окна, вычисляются признаки и подаются в нейросеть. При обнаружении сигнала, классифицированного как опасный, генерируется тревога и сохраняется запись.

Кроме того, нейросети могут использоваться для кластеризации неизвестных сигналов и выявления аномалий, что позволяет обнаруживать новые, ранее не встречавшиеся типы излучений.

В рамках данной работы предлагается создание прототипа системы на базе программно-определяемого радио и открытых программных средств машинного обучения. Такой прототип позволит отработать алгоритмы классификации и моделирования [8-10].

На основе проведённого анализа можно сформулировать следующие рекомендации:

- система должна строиться по модульному принципу с возможностью наращивания числа датчиков и вычислительных мощностей;
- необходимо обеспечить синхронизацию измерений и возможность триггерной записи при обнаружении подозрительных сигналов;
- прогностическая часть должна базироваться на гибридных моделях, сочетающих физическое моделирование и машинное обучение;
- для верификации прогнозов требуется периодическое проведение контрольных измерений и корректировка моделей;
- важным элементом является создание базы данных типовых источников излучения (библиотеки сигнатур) и её постоянное пополнение;
- интерфейс оператора должен обеспечивать наглядное отображение пространственного распределения угроз и уровней риска.

Разработка универсальной системы выявления и прогнозирования каналов утечки информации является актуальной научно-технической задачей. Предложенная концепция объединяет современные методы измерений, моделирования и искусственного интеллекта, что позволяет перейти от эпизодического контроля к непрерывному мониторингу и оценке рисков. Внедрение такой системы позволит существенно повысить защищённость информации от утечки по техническим каналам.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание действующего прототипа, разработку методов автоматической калибровки моделей и адаптацию алгоритмов машинного обучения к реальным условиям эксплуатации. Важным направлением является также учёт искусственно создаваемых каналов при проектировании сложных систем и интеграция прогнозных моделей в системы автоматизированного проектирования.

Список литературы:
1. Основы защиты информации от утечки по техническим каналам / А.А. Евстифеев, В.И. Ерошев, А.П. Мартынов [и др.]. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – 267 с.
2. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
3. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
4. Мартынова И.А., Николаев Д.Б. Обеспечение защиты результатов физических экспериментов с использованием современных алгоритмических методов. В сборнике: Информатизация образования – 2014. Материалы Международной научно-практической конференции. 2014. С. 262-264/
5. O'Shea T.J., Roy T., Clancy T.C. Learning robust general radio signal detection using computer vision methods // 2017 51st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. – IEEE, 2017. – P. 829-832.
6. Грибунин В.Г., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Криптография и безопасность цифровых систем: Учебное пособие. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2011. 411 с.
7. Radio Frequency Machine Learning Systems (RFMLS) // DARPA. – URL: https://www.darpa.mil/program/radio-frequency-machine-learning-systems (дата обращения: 15.03.2026).
8. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
9. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
10. Волков К.О., Мартынов А.П., Марунин М.В., Николаев Д.Б. Аналитические исследования характеристик информационной составляющей автоматизированных систем управления и контроля: Учеб.-метод. Пособие. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2017. – 197 с.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИВАТНОСТИ И СОЗДАНИЕ ЗАЩИЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ В ОБУЧЕНИИ

Грачева А.Н., Рыжов А.А., Точилин А.В.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Машинное обучение проникло во все сферы – от здравоохранения и финансов до оборонных систем и государственного управления. Модели ИИ обучаются на огромных массивах данных, которые часто содержат персональную, медицинскую, коммерческую или иную конфиденциальную информацию. Одновременно с ростом возможностей ИИ возрастают и риски: утечки данных, атаки на модели, кража интеллектуальной собственности, нарушение регуляторных требований [1].

Область, занимающаяся защитой приватности в машинном обучении, получила название Privacy-Preserving Machine Learning (PPML). Это совокупность правил, техник и протоколов, обеспечивающих конфиденциальность данных клиентов и самих моделей при сохранении возможности совместной работы и продуктивного использования. PPML позволяет организациям использовать мощь ML, сохраняя безопасность чувствительной информации, соблюдая законодательство и стимулируя обмен данными [2].

Цель данного доклада – предложить практические рекомендации по выбору технологий защиты в зависимости от сценария применения.

Прежде чем рассматривать методы защиты, необходимо классифицировать основные угрозы, которым подвергаются данные и модели [3].

Атаки извлечения позволяют злоумышленнику восстановить фрагменты обучающих данных путём запросов к модели. Наиболее известный пример – атака Карлини и Вагнера, показавшая возможность извлечения точных записей из языковых моделей.

Атаки инверсии модели направлены на восстановление обобщённых признаков обучающих данных. Фредриксон и др. продемонстрировали возможность восстановления лиц людей по модели распознавания лиц, имея доступ только к выходным вероятностям.

Атаки по членству (позволяют определить, использовался ли конкретный экземпляр данных при обучении модели. Это критически важно для медицинских и финансовых приложений, где сам факт наличия записи может раскрыть конфиденциальную информацию.

Кража модели злоумышленник, имея доступ к API модели, может восстановить её архитектуру и веса, создавая функциональный аналог. Это угрожает интеллектуальной собственности разработчика.

Атаки отравления – внесение вредоносных изменений в обучающие данные для искажения поведения модели. В федеративном обучении такие атаки могут осуществляться недобросовестными клиентами.

Состязательные атаки – формирование специально сконструированных входных данных, приводящих к ошибочной классификации при сохранении неразличимости для человека.

Современная PPML опирается на пять ключевых технологических направлений.

Федеративное обучение позволяет обучать модель на распределённых данных без их централизованного сбора. Клиенты (устройства или организации) локально обучают модель на своих данных и передают на сервер только обновления весов (градиенты), а не сами данные. Архитектура: централизованное – клиенты отправляют веса центральному агрегатору, который усредняет их и децентрализованное – клиенты обмениваются градиентами напрямую, без единого сервера. Преимущества федеративного обучения: исходные данные никогда не покидают устройство, соответствует требованиям GDPR и аналогичных регуляторов, экономит трафик – передаются только модели, а не сырые данные. Недостатки: уязвимость к атакам по градиентам, гетерогенность данных на клиентах снижает качество, требуются дополнительные механизмы защиты (дифференциальная приватность, безопасная агрегация).

Дифференциальная приватность предоставляет математически строгую гарантию: присутствие или отсутствие любого конкретного объекта в обучающем наборе не должно существенно влиять на выход модели. Механизм реализации: добавление контролируемого статистического шума в градиенты, веса или выходные данные. Параметры: ε (бюджет приватности) – чем меньше ε, тем сильнее защита; δ – вероятность нарушения гарантии.

Применение: DP-SGD – обрезка градиентов и добавление шума на каждом шаге обучения, локальная – шум добавляется на стороне клиента до передачи данных и глобальная – шум добавляется агрегатором.

Компромисс точность-приватность: эксперименты показывают, что при оптимальных настройках (σ=0,5; $\varepsilon\approx3$) достигнута точность 97,80 %, что лишь на 1 % уступает централизованному обучению (98,79 %).

Гомоморфное шифрование позволяет выполнять вычисления непосредственно над зашифрованными данными без их расшифровки. Типы: частично гомоморфное – поддерживает только один тип операций (сложение или умножение), не вполне гомоморфное – поддерживает ограниченное число операций обоих типов, полностью гомоморфное – поддерживает произвольные вычисления, но крайне ресурсоёмко. Применение в PPML: шифрование градиентов при передаче в федеративном обучении, конфиденциальный вывод – клиент отправляет зашифрованные данные, модель возвращает зашифрованный результат, гибридные схемы с пороговым шифрованием для защиты от сговора клиентов. Недостатки: высокие вычислительные накладные расходы, сложность реализации [4, 5].

Безопасные многосторонние вычисления позволяют нескольким сторонам совместно вычислить функцию по своим данным, не раскрывая эти данные друг другу. Принцип: данные разделяются на случайные доли (секретные доли), которые распределяются между участниками. Ни одна из сторон не имеет полной информации, но совместные вычисления дают корректный результат. Применение: безопасная агрегация градиентов в федеративном обучении, совместное обучение на данных нескольких организаций без раскрытия данных. Недостатки: высокий коммуникационный уровень, сложность масштабирования.

Доверенные среды исполнения – аппаратные изолированные области процессора, обеспечивающие конфиденциальность и целостность кода и данных даже от операционной системы. Применение: выполнение чувствительных вычислений в облаке с гарантией, что провайдер не имеет доступа к данным, безопасная агрегация в федеративном обучении на

недоверенном сервере. Недостатки: зависимость от конкретного производителя, уязвимости в реализации (атаки по сторонним каналам) [6].

В таблице 1 представлено сравнение основных методов PPML по ключевым критериям.

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов обеспечения приватности в ML

Метод	Приват-ность данных	Защита модели	Вычислительный уровень	Коммуникационный уровень	Применимость на практике
Федеративное обучение	Высокая	Низкая	Низкий	Средний	Широкая
Дифференци-альная приватность	Средняя	Средняя	Низкий	Низкий	Широкая
Гомоморфное шифрование	Очень высокая	Высокая	Очень высокий	Низкий	Ограниченная
Безопасные вычисления	Очень высокая	Средняя	Высокий	Высокий	Средняя
Доверенные среды	Высокая	Высокая	Средний	Низкий	Средняя

Ключевые выводы из сравнения: дифференциальная приватность обеспечивает наилучший баланс между защитой и производительностью для большинства сценариев, гомоморфное шифрование даёт максимальную криптографическую защиту, но неприменимо для больших моделей в реальном времени, федеративное обучение решает проблему сбора данных, но требует дополнительных мер защиты от атак по градиентам.

Современные исследования показывают, что наиболее эффективная защита достигается комбинированием различных методов [7].

Гибрид гомоморфного шифрования и дифференциальной приватности разработана для защиты медицинских изображений в федеративном обучении. Архитектура: локальная дифференциальная приватность на стороне клиентов для защиты от утечек при передаче градиентов, (N, P)-пороговое гомоморфное шифрование для безопасной агрегации – расшифровка возможна только при участии не менее P клиентов, что защищает от сговора, центр фильтрации для выявления вредоносных клиентов без раскрытия их параметров [9].

Результаты: схема обеспечивает защиту от атак отравления, коллизионных атак и инверсии модели, улучшая точность до 82,62 % при сохранении высокой приватности.

Гибридная модель для работы с большими данными (комбинация федеративного обучения, дифференциальной приватности и гомоморфного шифрования для защиты идентификационных данных). Результаты показывают, что гибридная модель обеспечивает наилучшую защиту при сохранении времени выполнения на уровне 0,03 секунды на запись.

Помимо защиты данных, необходимо защищать сами модели – интеллектуальную собственность разработчиков [10].

Основные методы:

- обфускация весов нейросетей – изменение структуры хранения весов таким образом, чтобы они стали трудно читаемыми для анализа. Обфускация не влияет на точность, но увеличивает сложность реверс-анализа;
- шифрование весов – параметры модели хранятся в зашифрованном виде и расшифровываются только в момент выполнения в доверенной среде. Надёжно, но требует аппаратной поддержки;
- водяные знаки – встраивание скрытых маркеров в поведение модели, позволяющих доказать принадлежность при краже. Метод не предотвращает кражу, но позволяет установить факт нарушения прав;
- федеративное обучение как защита модели – поскольку модель никогда не существует в централизованном виде полностью, её кража затруднена. Однако финальная глобальная модель всё равно уязвима.

Практические рекомендации по выбору методов защиты.

Выбор конкретного метода или их комбинации зависит от сценария применения.

Сценарий 1: Медицинские данные (многоклинические исследования).

Требования: максимальная защита, соответствие HIPAA/152-ФЗ, возможность совместного анализа без раскрытия данных. Рекомендация: федеративное обучение + пороговое гомоморфное шифрование + локальная дифференциальная приватность. Пример: DPSHE.

Сценарий 2: Финансовые транзакции (обнаружение мошенничества).

Требования: высокое быстродействие, защита от инверсии модели, соответствие PCI DSS. Рекомендация: федеративное обучение + дифференциальная приватность (умеренный бюджет $\varepsilon \approx 3–5$). Гомоморфное шифрование избыточно из-за задержек.

Сценарий 3: Облачные сервисы с конфиденциальным выводом

Требования: защита данных клиента от провайдера, минимальная задержка.

Рекомендация: частичное гомоморфное шифрование (для простых моделей) или доверенные среды исполнения (SGX). Клиентская часть может использовать дифференциальную приватность для дополнительной защиты.

Сценарий 4: Защита коммерческой модели от кражи.

Требования: предотвращение извлечения архитектуры и весов при публикации модели.

Рекомендация: обфускация весов + водяные знаки + развёртывание через API с ограничением числа запросов [11-13].

Перспективные направления исследований.

С развитием квантовых компьютеров существующие криптосистемы (RSA, ECC) станут уязвимы. Разрабатываются пост-квантовые алгоритмы для гомоморфного шифрования и безопасных вычислений.

Динамическое изменение уровня шума в зависимости от чувствительности данных и стадии обучения позволяет улучшить компромисс точность-приватность.

Создание полностью искусственных наборов данных, сохраняющих статистические свойства реальных, но не содержащих реальных записей. Позволяет обучать модели без доступа к чувствительным данным.

Аппаратные ускорители и специализированные архитектуры (FPGA, ASIC) для FHE могут сделать его практически применимым в ближайшие 5-7 лет.

Методы, основанные на токенизации без использования ключей, позиционируется как элемент цифрового суверенитета и может применяться для формирования безопасных наборов данных при обучении ИИ.

Обеспечение приватности в машинном обучении перестало быть опциональным требованием – это необходимость, диктуемая как регуляторами, так и этическими соображениями, и интересами бизнеса [14].

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие ключевые выводы:

1. Универсального решения не существует – выбор метода защиты зависит от сценария, требований к производительности и модели угроз.

2. Дифференциальная приватность предоставляет наилучший баланс между защитой и практичностью для большинства приложений, особенно в сочетании с федеративным обучением.

3. Гибридные подходы обеспечивают синергетический эффект, закрывая уязвимости отдельных методов.

4. Защита самих моделей (от кражи и реверс-инжиниринга) становится столь же важной, как и защита данных, особенно для коммерческих разработок.

5. Практическая реализация требует не только выбора алгоритмов, но и грамотного развёртывания с учётом реальных ограничений по времени, памяти и коммуникациям.

Дальнейшее развитие PPML будет определяться прогрессом в аппаратном ускорении криптографических примитивов, разработкой квантово-устойчивых алгоритмов и совершенствованием методов генерации синтетических данных. Организациям, внедряющим ИИ, рекомендуется уже сегодня интегрировать принципы обеспечения приватности в свои разработки, закладывая фундамент для безопасного и соответствующего регуляторным требованиям будущего.

Список литературы:

1. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.

2. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
3. Стеганографические системы. Атаки, пропускная способность каналов и оценка стойкости / В.Г. Грибунин, В.Е. Костюков, А.П. Мартынов [и др.]; Под ред. В.Г. Грибунина. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 217 с.
4. Chen H. A Comprehensive Review of Machine Learning Privacy // 2024 6th International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI). 2024. P. 81-85.
5. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
6. Gajjar H., Divecha N. Enhancing Big Data Privacy and Performance Through Edge-Integrated Federated Learning: A Comparative Study // International Journal of Applied Mathematics. 2025.
7. Бабанов Н.Ю., Евстифеев А.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Основы защиты информации в современных информационных системах: учебное пособие. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. – 175 с.
8. Конфиденциальность данных в искусственном интеллекте: передовой опыт и внедрение // Ultralytics. 2026.
9. Liu X., Sun H., Sun N., Jia B., Xiao D. DPSHE: A privacy-preserving federated learning scheme based on homomorphic encryption and differential privacy for medical image // Neurocomputing. 2026. Vol. 661. 131931. DOI: 10.1016/j.neucom.2025.131931
10. Ерболатов А. Н. Реверс-инжиниринг против искусственного интеллекта: анализ самозащищенных моделей ИИ // КиберЛенинка. 2025.
11. Мартынова И.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Система пространственно-группового преобразования информационных потоков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2022. № 1. С.70-82.
12. Грибунин В.Г., Костюков В.Е., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Стеганографические системы. Критерии и методическое обеспечение. Учебно-методическое пособие. Грибунин В.Г (ред.). Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ"; 2016. 324с.
13. Грибунин, В.Г. Стеганографические системы. Цифровые водяные знаки / В.Г. Грибунин, В.Е. Костюков, А.П. Мартынов, Д.Б. Николаев, В.Н. Фомченко. – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2016. – 210 с.
14. Грибунин В.Г., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Криптография и безопасность цифровых систем: Учебное пособие. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2011. 411 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Горбатенко Н.В., Мартынов А.П.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Для создания многокомпонентных технических комплексов возникает необходимость разработки единой методологии инженерного проектирования [1-3].

В основе создания автоматизированных средств разработки проекта сложной технической системы - формализация инженерного проектирования и описание процесса проектирования универсальным математическим языком [4].

Необходимо провести обобщение существующего опыта проектирования с позиций математического моделирования, системного анализа и оптимизации, а также определить новые подходы к проектированию сложных многокомпонентных технических систем управления и специализированных систем преобразования информации [5-7].

Проектирование защищённой системы - это процесс переработки информации, содержащейся в техническом задании и нормативных документах, а также в знаниях проектировщика, в информацию, образующую проект системы, также в данный процесс включаются процедуры принятия решений.

При этом математические модели сложных, разветвленных процессов могут быть представлены графами.

Начало процесса проектирования определяется состоянием, задаваемым техническим заданием и выбранным прототипом.

Таким образом, процесс проектирования – это разветвленный процесс в пространстве состояний.

Граф, описывающий процесс проектирования системы в пространстве состояний, является неявно заданным.

Рассмотрим основные группы и особенности алгоритмов поиска на неявно заданном графе [8].

Поиск в пространстве состояний описывает трансформацию системы в процессе проектирования.

Этот же процесс может быть описан с позиций проектировщика, осуществляющего такую трансформацию, при этом возникает поиск в пространстве подзадач, который также описывается графом.

Такой граф называется пропозиционным.

В случае, когда известна методика создания, задача традиционного проектирования порождает указанный пропозиционный граф (то есть граф, в котором все вершины заранее известны и разрешимы).

Этот граф представляет собой сетевой график создания проекта.

Для моделирования процесса проектирования на основании сетевого графика (пропозиционного графа) необходимо решить задачу обхода узлов графа поиска в пространстве подзадач, где каждая подзадача реализована в виде частной методики проектирования или компьютерной программы.

Моделирование процесса проектирования, таким образом, сводится к моделированию информационных потоков в графе.

Проектирование системы в пространстве состояний и в пространстве подзадач связывают воедино эвристические процедуры.

Отличие эвристической процедуры поиска на графе от алгоритмического поиска в том, что эвристическая процедура оценивает не только перспективность перехода к той или иной вершине графа, но и перспективность способа, каким этот переход осуществляется.

Множество способов решения подзадач может быть интерпретировано как множество операторов преобразования пространства состояний.

Рассмотренные комплексные подходы, алгоритмы и способы формализации процесса проектирования сложных технических систем могут быть положены в основу разработки и компоновки программно-аппаратных средств, автоматизирующих этапы сквозного проектирования наукоёмкой продукции.

Применение рассмотренных комплексных подходов обеспечит повышение качества изделий с одновременным сокращением сроков выпуска продукции [9-13].

Список литературы:

1. Горбатенко Н.В., Мартынов А.П. Опыт разработки электронной учебной системы // Педагогическая информатика. 2023. №1.
2. Горбатенко Н.В., Мартынов А.П. Создание электронных учебных пособий с использованием цифровых двойников // Педагогическая информатика. 2023. №1.
3. Горбатенко Н.В., Ведерников В.Л., Мартынов А.П. Создание интерактивной составляющей электронных учебных технических средств приборов радиоэлектронной аппаратуры с применением Интернет-технологий // Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XIII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 2019. – С. 23-25.
4. Персонализация образовательного процесса на основе интерактивной системы обучения с элементами искусственного интеллекта. Необходимость взаимодействия естественного и искусственного интеллектов в системах образования различного уровня: коллективная монография / Под ред. С.О. Крамарова. – М.: РИОР, 2024- С. 125-129.
5. Кроссплатформенная отечественная система обучения с элементами искусственного интеллекта. Необходимость взаимодействия естественного и искусственного интеллектов в системах образования различного уровня: коллективная монография / Под ред. С.О. Крамарова. – М.: РИОР, 2025- С. 322-325.
6. Ведерников В.Л., Горбатенко Н.В. Разработка интерактивного электронного учебного пособия без использования программного кода // Математика и математическое

моделирование. Сборник материалов XVI Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 2022.– С.39-40.
7. Ведерников В.Л., Горбатенко Н.В. Программный веб-тренажер как альтернатива реальным учебно-тренировочным техническим средствам // Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XIII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 2020.– С.133-134.
8. Трищенков А.В. и др. Концептуальные основы автоматизации проектирования сложных защищённых систем. Нижегородская сессия молодых ученых. Математические науки (14; 2009). Н. Новгород: Гладкова О.В., 2009.- С.25-26.
9. Горбатенко Н.В., Ведерников В.Л. и др. Веб-тренажер типового прибора радиоэлектронной аппаратуры, версия 2.0. Свидетельство о гос. регистрации базы данных №2023621670 от 07.04.2023.
10. Горбатенко Н.В., Ведерников В.Л. и др. Электронное учебное пособие «Устройство и эксплуатация типовых приборов РЭА», версия 1.0. Свидетельство о гос. регистрации базы данных №2023621824 от 13.04.2023.
11. Фомченко В.Н., Ведерников В.Л., Горбатенко Н.В. Волков К.О. Интерактивный веб-тренажер обучения. Свидетельство о гос. регистрации изобретения № 2723365 от 10.06.2020.
12. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
13. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.

ЭТАПЫ И РЕГЛАМЕНТ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Горбатенко Н.В., Ведерников В.Л.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Системный анализ в настоящее время находится в авангарде научных исследований. Лидирующая роль системного анализа обусловлена тем, что развитие науки, особенно в XX веке, привело к возникновению новых типов научных задач. С начала XX века в целом ряде областей науки центральное место начинают занимать проблемы организации и функционирования сложных (многоуровневых, иерархических, самоорганизующихся биологических, психологических, социальных, технических) саморазвивающихся объектов, исследование которых требует рассмотрения данных объектов как систем.

Аппарат теории систем и системного анализа получил широкое распространение, прежде всего, в экономическом анализе для исследования экономических показателей деятельности предприятия. Однако системный анализ можно применять и для повышения эффективности разработки сложных технических систем, в частности, автоматизированных систем (АС) [1,7,12,13-15].

Цель системного анализа – исследование «проблемосодержащей» системы, т.е. системы, в которой возникла проблема, анализ причин ее возникновения и синтез системы мер для ликвидации проблемы) [2]. Методы и модели системного анализа в первую очередь используются на ранних этапах проектирования или развития сложных систем, т.е. таких этапах, как «анализ проблем», «предпроектное обследование», «эскизное проектирование», «этап научно-исследовательских работ» и т.д.

На данных этапах выполняются такие работы, как выявление проблем (узких мест) в существующих системах, выявление целей, направлений проектирования или совершенствования систем, определение перспективных вариантов на разных уровнях.

Эти работы являются слабо формализуемыми, «творческими» и одновременно очень важными, поскольку они формируют основу, «каркас» создаваемой проблеморазрешающей системы, основные направления ее синтеза, которые в дальнейшем прорабатываются, уточняются, детализируются.

Решения, принимаемые на ранних этапах, в первую очередь определяют качество конечного результата.

Неоднократно имели место попытки создать достаточно общий, универсальный алгоритм системного анализа. Исследование имеющихся в литературе алгоритмов проведения системного анализа показывает, что у них присутствует большая степень общности в целом и есть некие различия в частностях, деталях. Можно выделить пять укрупненных этапов системного анализа, приведенных на рисунке 1, представленных практически во всех вариантах системной последовательности в том или ином виде) [6].

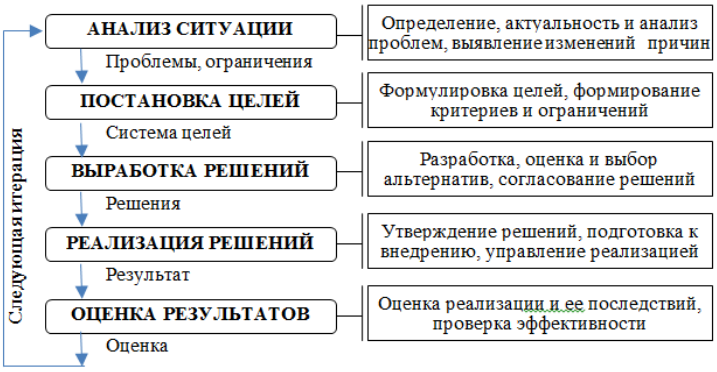


Рисунок 1 - Этапы системного анализа

Регламент процесса проведения системного анализа представляет собой руководящие указания по составу этапов и их последовательности, а также используемым на каждом из этапов методам формирования моделей и поиска решений.

В соответствии с принципом декларативности регламент представляется не в виде алгоритма, а в виде совокупности рекомендаций для каждого из основных этапов типовой последовательности относительно содержания этапа, вида формируемых моделей и спектра методов, которые могут быть использованы разработчиком для формирования модели и поиска решения на ней) [2,3,4].

Вариант регламента проведения системного анализа при проектировании АС приведен на рисунке 2. При этом на подготовительном этапе формируется модель процесса проведения системного анализа, на этапе анализа – модель проблемосодержащей системы (модель АС) и т.п. [6].

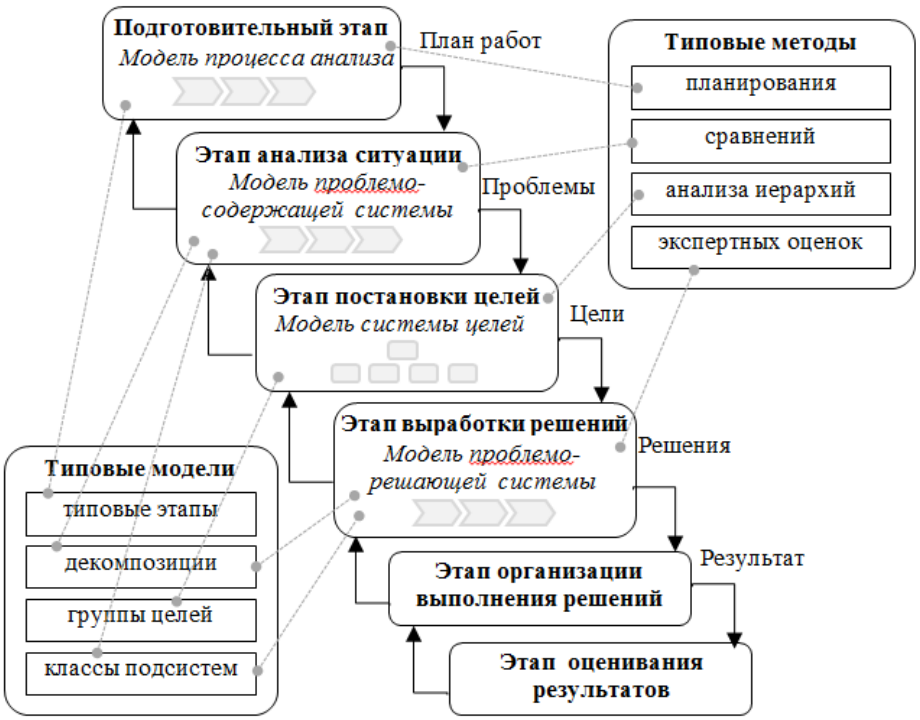


Рисунок 2 - Вариант регламента проведения системного анализа при проектировании АС

На подготовительном этапе производится выбор способа организации процесса проведения системного анализа (определение последовательности этапов, описание работ, исполнителей, используемых методов и средств), а также создание коллектива разработчиков.

На этапе анализа ситуации исследуется проектируемая система (АС) – выявляются и анализируются проблемы и ограничения АС, строится модель системы.

На этапе постановки целей формулируются цели и задачи проектирования данной АС, исходя из проблем, выявленных на этапе анализа ситуации, а также проводится формирование модели системы целей (дерева целей).

На этапе выработки решений проводится поиск решений для ликвидации проблем и ограничений разрабатываемой АС, выявленных на этапе анализа системы, исходя из целей и задач, сформулированных на этапе постановки целей.

На этапе организации выполнения решений осуществляется разработка плана реализации принятых на предыдущем этапе решений, оценка рисков.

На этапе оценивания результатов осуществляется сравнительный анализ состояния, достигнутого в результате реализации решений, или прогнозируемых состояний с целевым состоянием согласно критериям, определенным на этапе постановки целей [3,7].

Говоря о внедрении результатов системного анализа, важно отметить, что в реальной жизни ситуация, когда сначала проводят исследования, а затем их результаты внедряют в практику, встречается крайне редко, лишь в тех случаях, когда речь идёт о простых системах.

Но системный анализ – это не только один из важнейших методов в системном подходе, как эффективное средство решения сложных, обычно недостаточно четко сформулированных проблем, какими и являются проектирование сложных АС предприятия, но и прикладная наука, его конечная цель – изменение существующей ситуации в соответствии с поставленными целями.

Конечный результат будет зависеть не только от того, насколько совершенны и теоретически обоснованы методы, применяемые при проведении анализа, но и от того, насколько грамотно и качественно реализованы полученные рекомендации [8-16].

При системном подходе к проектированию АС можно получить не только оптимизированную АС, но и ее электронную цифровую модель с возможностью

моделирования широкого круга задач, которые возникают в процессе разработки и эксплуатации проектируемой АС.

Список литературы:

1. В.Л. Ведерников, Н.В. Горбатенко, А.П. Мартынов. Электронные учебные пособия на этапах жизненного цикла приборов и радиоэлектронной аппаратуры: сборник трудов XXXVIII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем».– Серпухов. – 2019.
2. В.А. Силич, М.П. Силич. Теория систем и системный анализ: учебное пособие/В.А. Силич, М.П. Силич. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 276 с.
3. В.Л. Ведерников, Н.В. Горбатенко, А.В. Колованов. Критерии оценки пользовательского интерфейса систем автоматизированного проектирования: сборник трудов XXXVIII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем».– Серпухов. – 2019.
4. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
5. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
6. Горбатенко Н.В., Ведерников В.Л. Системный подход в обучении эксплуатации наукоемких изделий// Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XV Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 2021.
7. Горбатенко Н.В., Ведерников В.Л., Мартынов А.П. Создание интерактивной составляющей электронных учебных технических средств приборов радиоэлектронной аппаратуры с применением Интернет-технологий // Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XIII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 2019. – С. 23-25.
8. Ведерников В.Л., Горбатенко Н.В. Программный веб-тренажер как альтернатива реальным учебно-тренировочным техническим средствам // Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XIII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 2020.– С.133-134.
9. Горбатенко Н.В., Ведерников В.Л. и др. Веб-тренажер типового прибора радиоэлектронной аппаратуры, версия 2.0. Свидетельство о гос. регистрации базы данных №2023621670 от 07.04.2023.
10. Горбатенко Н.В., Ведерников В.Л. и др. Электронное учебное пособие «Устройство и эксплуатация типовых приборов РЭА», версия 1.0. Свидетельство о гос. регистрации базы данных №2023621824 от 13.04.2023.
11. Фомченко В.Н., Ведерников В.Л., Горбатенко Н.В. Волков К.О. Интерактивный веб-тренажер обучения. Свидетельство о гос. регистрации изобретения № 2723365 от 10.06.2020.
12. Ведерников В.Л., Горбатенко Н.В. Разработка интерактивного электронного учебного пособия без использования программного кода // Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XVI Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 2022.– С.39-40.
13. Горбатенко Н.В., Мартынов А.П. Опыт разработки электронной учебной системы // Педагогическая информатика. 2023. №1.
14. Горбатенко Н.В., Мартынов А.П. Создание электронных учебных пособий с использованием цифровых двойников // Педагогическая информатика. 2023. №1.
15. Необходимость взаимодействия естественного и искусственного интеллектов в системах образования различного уровня: коллективная монография / Под ред. С.О. Крамарова. – М.: РИОР, 2024- С. 125-129.
16. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ботова Е.А., Малоземов А.А.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Проектирование сложных технических систем – от аэрокосмической техники до промышленного оборудования – всегда представляло собой многокритериальную задачу, требующую поиска компромиссов между массой, прочностью, технологичностью, стоимостью и другими противоречивыми требованиями. Традиционные системы автоматизированного проектирования (САПР) выступали в роли инструментов документирования решений, принимаемых человеком, но не активных участников процесса синтеза новых конструкций.

Ситуация кардинально меняется с внедрением технологий искусственного интеллекта. Современные САПР переходят от пассивного «черчения» к активному партнёрству в поиске оптимальных решений. Технологии искусственного интеллекта, особенно глубокое обучение и большие языковые модели, демонстрируют значительный прогресс в обучении на существующих наборах данных и генерации инновационных проектов, что отличает их от традиционных экспертных систем и алгоритмов, вдохновлённых биологией [1].

Цель данного доклада – систематизировать современные подходы к применению искусственного интеллекта (ИИ) в САПР сложных технических систем, проанализировать достигнутые результаты и ограничения, а также определить перспективные направления развития.

Исторически развитие систем автоматизированного проектирования прошло несколько этапов:

1. 2D-черчение – автоматизация рутинных операций по выпуску чертёжной документации.
2. 3D-моделирование – создание объёмных моделей, позволяющих визуализировать и проверять собираемость.
3. Параметрическое моделирование – установление связей между элементами модели, обеспечивающее автоматическое обновление геометрии при изменении параметров.
4. Имитационное моделирование и расчёты – интеграция с CAE-системами для проверки прочности, аэродинамики, тепловых режимов.
5. Интеллектуальные САПР – системы, способные самостоятельно генерировать варианты конструкций, оценивать их по множеству критериев и предлагать оптимальные решения.

В современной конкурентной среде проектирования изделий спрос на компоненты, которые одновременно являются лёгкими и высокопрочными, продолжает расти. Снижение веса без ущерба для структурной целостности напрямую влияет на производительность, топливную эффективность, стоимость и устойчивость.

Анализ современных исследований и промышленных внедрений позволяет выделить три ключевых направления интеграции искусственного интеллекта в процессы проектирования сложных технических систем [2].

Генеративный дизайн представляет собой методологию, при которой проектировщик задаёт не форму изделия, а ограничения и требования: допустимое пространство, точки крепления, прикладываемые нагрузки, материалы, технологию производства. Система на основе алгоритмов оптимизации самостоятельно генерирует множество вариантов конструкции, удовлетворяющих заданным условиям.

Топологическая оптимизация является ключевым вычислительным методом, лежащим в основе генеративного дизайна. В отличие от традиционного подхода, где конструктор начинает с предполагаемой геометрии, топологическая оптимизация стартует с полного доступного объёма и стратегически удаляет материал, наименее значимый для структурной производительности. Это часто приводит к высокоорганичным, решётчатым структурам, которые бросают вызов традиционной геометрической интуиции [3, 4].

Процесс типично включает: определение расчётной области, задание сохраняемых геометрий (места соединений), указание геометрий препятствий (зоны исключения), задание случаев нагружения, выбор материала и технологии производства, запуск итеративного процесса оптимизации с использованием метода конечных элементов

Современные платформы САПР реализуют генеративный дизайн на облачной архитектуре, позволяя выполнять параллельные итерации и оценивать множество кандидатов по пределам материалов и производственным маршрутам. Вместо выполнения одной процедуры топологической оптимизации платформа может создавать десятки или даже сотни жизнеспособных вариантов, каждый из которых адаптирован под конкретные критерии, такие как минимальная масса, максимальная жёсткость или сбалансированные компромиссы.

Проектирование сложных технических систем требует учёта требований различных инженерных дисциплин: механики, электротехники, теплофизики, гидравлики. Традиционно эти аспекты рассматривались последовательно, что приводило к субоптимальным решениям.

Современный подход, реализованный объединяет генеративный дизайн и моделирование для быстрого исследования концепций структурных деталей с учётом производственных ограничений для 3D-печати, литья, механической обработки, формования и ковки. Ключевая особенность – использование методов машинного обучения для: сокращения пространства поиска – выделение наиболее перспективных областей проектных параметров, построения суррогатных моделей – аппроксимация ресурсоёмких расчётов быстрыми нейросетевыми моделями, многокритериальной оптимизации – поиск Парето-оптимальных решений, балансирующих противоречивые требования. Результаты применения данного подхода впечатляют: в реальных задачах достигнуто снижение затрат жизненного цикла на 15,8%, уменьшение энергопотребления на 21,2% и значительное сокращение времени предварительного моделирования.

Наиболее молодая и активно развивающаяся тенденция – применение больших языковых моделей (LLM) для автоматизации процессов проектирования. Уже разработаны программные средства, позволяющие генерировать CAD-геометрию на основе текстовых описаний с использованием LLM-агентов. Архитектура LLM-агента для проектирования включает в себя интерпретацию запроса на естественном языке, вызов функций для выполнения конкретных операций моделирования, генерацию и выполнение CAD-кода, а также анализ результатов и итеративное уточнение. Наилучшие результаты показал агентский рабочий процесс с автоматической визуальной обратной связью, особенно с использованием мультимодальных LLM.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ инструментальных платформ.

Несмотря на впечатляющие результаты, применение ИИ в САПР сталкивается с рядом фундаментальных ограничений.

Многие модели, на которых строятся генеративные алгоритмы, остаются «чёрными ящиками». Инженер видит результат – оптимизированную геометрию, но не всегда может понять, почему алгоритм пришёл именно к такому решению. Это создаёт проблему доверия, особенно в критических применениях, где цена ошибки высока. Существующие автоматизированные подходы к проектированию демонстрируют критические ограничения. Они имеют тенденцию фокусироваться на конкретных задачах проектирования и с трудом переносятся в другие области. Они также требуют специфических знаний о требованиях каждой задачи, что представляет собой препятствие для начинающих проектировщиков [5].

Топологическая оптимизация, несмотря на свою мощность, не даёт окончательного геометрического решения. Органические результаты, полученные в результате этого процесса, часто требуют интерпретации и постобработки, чтобы соответствовать производственным ограничениям или эстетическим целям.

Применение больших языковых моделей в проектировании сталкивается с галлюцинациями – модель заполняет пробелы в знаниях вымышленной информацией, ограниченной доступностью специализированных инженерных данных для обучения и проблемами пространственного мышления – модели часто не понимают трёхмерных взаимосвязей [6, 7].

Использование облачных вычислений для генеративного дизайна требует передачи интеллектуальной собственности на внешние серверы. Для этого необходимо запрашивать документацию по стандартам шифрования для телеметрии проектирования, так как обработка интеллектуальной собственности происходит вне локальной инфраструктуры.

Но ключевым вызовом является организация эффективного взаимодействия человека и ИИ в проектных процедурах, которая подразумевает использование и человеческого творчества, и эффективности ИИ в инженерии.

Таблица 1. Сравнение платформ для ИИ-управляемого проектирования

Платформа	Разработчик	Ключевые возможности	Архитектура	Результаты внедрения
Autodesk Fusion Generative Design	Autodesk	Топологическая оптимизация, многокритериальная генерация, реконструкция B-Rep, бенчмаркинг устойчивости	Гибридная (локальная + облачная)	Десятки вариантов дизайна, учёт производственных ограничений
Cognitive Design 2.0	Cognitive Design Systems	Design Explorer, мультикритериальное сравнение, интеграция расчётов стоимости и CO_2	Облачная платформа	До 50% сокращения сроков, 30% снижения массы
Connectivity AI	HARTING	Языковая модель + генеративный дизайн, генерация CAD по текстовому описанию	Гибридная	Автоматизация рутинных задач, быстрое прототипирование
Фреймворк LLM-агентов	ETH Zurich / Inspire AG	Генерация CAD-кода по тексту, автоматическая обратная связь по визуализации	Исследовательская	Генерация геометрий для топологической оптимизации и аддитивного производства

Перспективные направления развития.

Развитие агентных архитектур, способных самостоятельно выполнять сложные многозвенные процессы проектирования с минимальным участием человека. Например, программные средства, в которых LLM-агенты могут автономно использовать различные инструменты для решения проблем [8, 9].

Переход от оптимизации по одному-двум критериям к всестороннему учёту всех аспектов жизненного цикла: от добычи сырья до утилизации.

Развитие моделей, способных одновременно работать с текстовыми описаниями, геометрическими данными, расчётными схемами и производственными ограничениями. Мультимодальные LLM демонстрируют лучшие результаты в задачах генерации CAD-геометрии благодаря возможности визуальной обратной связи.

По мере развития квантовых вычислений потребуется переход на пост-квантовые криптоалгоритмы для защиты интеллектуальной собственности, передаваемой в облачные вычислительные кластеры.

Разработка стандартов верификации результатов, полученных с помощью генеративного дизайна, и методов доказательства корректности решений, предложенных ИИ, в критических применениях [10].

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Искусственный интеллект трансформирует САПР – происходит переход от пассивного документирования к активному синтезу проектных решений, где система выступает партнёром инженера в поиске оптимальных конструкций.

2. Три ключевых направления – генеративный дизайн с топологической оптимизацией, многодисциплинарная оптимизация на основе машинного обучения и интеграция больших языковых моделей – определяют современное развитие интеллектуальных САПР.

3. Достигнутые результаты впечатляют: сокращение сроков проектирования до 50%, снижение массы до 30%, уменьшение энергопотребления на 21% и затрат жизненного цикла на 16%.

4. Существуют фундаментальные ограничения – проблемы интерпретируемости, доверия, конфиденциальности и качества человеко-машинного взаимодействия требуют дальнейших исследований.

5. Промышленное внедрение активно развивается – примеры внедрения демонстрируют зрелость технологий и готовность к масштабированию.

Дальнейшее развитие будет определяться прогрессом в области мультимодальных моделей, агентных архитектур и методов верификации, а также решением проблем защиты интеллектуальной собственности в облачных вычислениях. Организации, внедряющие ИИ-управляемое проектирование, получают значительное конкурентное преимущество за счёт сокращения сроков разработки, снижения массы изделий и учёта экологических критериев на самых ранних этапах проектирования.

Список литературы:

1. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.
2. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
3. Мартынова И.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Система пространственно-группового преобразования информационных потоков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2022. № 1. С.70-82.
4. Подгруппы симметрических групп подстановок ряда факториальных множеств / А.П. Мартынов, И.А. Мартынова, Д.Б. Николаев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 1. – С. 53-62.
5. Что такое генеративное проектирование для пользователя САПР SOLIDWORKS? // 3DCAD.news. 20.08.2024.
6. Schüpbach A., San Miguel R., Ferchow J., Meboldt M. From text to design: a framework to leverage LLM agents for automated CAD generation // Proceedings of the Design Society. 2025. DOI: 10.1017/pds.2025.256
7. Nemme A., Walden R. Integrating generative design and topology optimisation with product design values // Australasian Journal of Technology Education. 2022.
8. Волков К.О., Мартынов А.П., Марунин М.В., Николаев Д.Б. Аналитические исследования характеристик информационной составляющей автоматизированных систем управления и контроля: Учеб.-метод. Пособие. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2017. – 197 с.
9. Немченко, И.А. Обеспечение безопасности качественной составляющей информации с использованием стохастических алгоритмов / И.А. Немченко, Д.Б. Николаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 35. – С. 126-128.
10. A winning hand thanks to “Game Changer” // HANNOVER MESSE. 13.11.2025.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аркадьев С.Ю., Николаева И.А.
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Современные киберфизические системы (КФС) представляют собой сложные интеграции вычислительных, коммуникационных и физических компонентов, обеспечивающих автоматизацию и управление критически важными процессами. От интеллектуальных энергосетей и транспортных систем до промышленных комплексов – спектр применения КФС постоянно расширяется, а их роль в обеспечении жизнедеятельности общества неуклонно возрастает.

Однако эта интеграция порождает и новые уязвимости: отказы или атаки в киберпространстве могут привести к непредсказуемым последствиям в физическом мире, и наоборот. Традиционные подходы к оценке надёжности систем, оперирующие методами теории надёжности, не всегда могут быть применены для оценки живучести, поскольку не учитывают адаптивный характер угроз и тесную взаимосвязь между кибер- и физической составляющими. В отличие от классических отказов, разрушительные воздействия могут быть целенаправленными, скрытыми и адаптивными [1].

В связи с этим, живучесть становится ключевым свойством КФС, определяющим способность системы сохранять работоспособность и выполнять критические функции в условиях деструктивных воздействий, будь то целенаправленные кибератаки, сбои оборудования или неблагоприятные внешние факторы [2]. Цель настоящего доклада –

систематизировать и проанализировать современные математические методы, применяемые для оценки живучести КФС при комбинированных воздействиях, а также выявить перспективные направления исследований в этой области.

В контексте информационной безопасности и теории сложных систем, живучесть часто определяется как способность системы выполнять заданные функции и своевременно восстанавливаться после деструктивных воздействий [3]. Существует методический подход к формированию системы показателей живучести информационно-телекоммуникационных систем (ИТС) на основе анализа условий их применения и факторов, влияющих на живучесть. Для количественного описания свойств живучести вводится вероятностная область, на основе которой предлагаются единичные и комплексные меры живучести.

Понятия «устойчивость» и «компьютерная атака» могут быть уточнены применительно к задаче оценивания функциональной устойчивости элементов информационной инфраструктуры. Живучесть рассматривается как свойство, которое не всегда может быть адекватно оценено количественными методами теории надежности, особенно при множественных компьютерных атаках.

Ключевые свойства живучести включают:

1) устойчивость – способность противостоять воздействиям;

2) восстанавливаемость – способность возвращаться к нормальному функционированию после воздействия;

3) адаптивность – способность изменять поведение для сохранения критических функций в условиях деградации.

Развитие понятия «киберустойчивость» акцентирует внимание на способности системы предвидеть, выдерживать, восстанавливаться и адаптироваться к неблагоприятным условиям, включая кибератаки, продолжая выполнять основные функции. Этот подход смещает фокус с превентивной защиты на обеспечение операционной непрерывности даже в скомпрометированных состояниях.

КФС подвержены широкому спектру воздействий, которые можно классифицировать следующим образом [4]:

- кибер-воздействия, такие как компьютерные атаки (вирусы, отказ в обслуживании, вторжения в сети управления); атаки на целостность данных (подмена показаний датчиков, инъекция ложных команд) и атаки на доступность (блокировка каналов связи, компрометация узлов управления);

- физические воздействия, такие как отказы оборудования (выход из строя датчиков, исполнительных механизмов, источников питания), внешние природные факторы (экстремальные погодные условия, стихийные бедствия) и техногенные аварии (пожары, обрушения, разрывы трубопроводов);

- комбинированные воздействия.

Наиболее сложными для анализа являются сценарии, где кибер- и физические воздействия объединяются. Классическим примером служат каскадные отказы в энергосистемах: кибератака на диспетчерский пункт приводит к отключению линий электропередач, что, в свою очередь, вызывает перегрузку оставшихся линий и веерное отключение потребителей. Примеры включают блэкаут в Италии 2003 года, отключение электроэнергии в США и Канаде 2003 года и отключение электроэнергии на Украине 2015 года. Комбинированные воздействия могут быть одновременными (например, кибератака на систему управления во время землетрясения) или последовательными (физическая поломка, за которой следует эксплуатация уязвимости в резервной системе). В отличие от независимых воздействий, комбинированные часто демонстрируют синергетический эффект, когда суммарный ущерб превышает сумму ущербов от каждого воздействия в отдельности [5].

Для количественной оценки живучести КФС в условиях комбинированных воздействий применяется широкий спектр математических методов, которые можно разделить на несколько групп.

Методы, основанные на теории марковских и полумарковских процессов.

Одним из наиболее эффективных подходов является применение теории полумарковских процессов. Существует подход к оцениванию функциональной устойчивости элементов информационной инфраструктуры, функционирующих в условиях множества компьютерных атак, с использованием методов теории полумарковских процессов. Основная идея заключается в сведении задачи оценивания функциональной устойчивости к задаче поиска функции живучести исследуемого элемента и определению её экстремальных значений.

Модель учитывает ограничения на ресурс, выделенный для поддержания живучести, и принимает произвольные законы распределения случайных времён реализации компьютерных атак и времен восстановления функционала элемента.

Преимуществом полумарковских моделей является их способность описывать процессы с произвольными распределениями времен пребывания в состояниях, что особенно важно для моделирования атак с непредсказуемой длительностью и интервалами восстановления. В результате тестового моделирования строятся графики функции живучести, и полученное приложение может быть использовано на практике для построения функции живучести при реализации до трёх компьютерных атак, а также как инструмент для оценивания достоверности аналогичных статистических моделей.

В рамках марковских процессов принятия решений формализуется метод анализа устойчивости поведения КФС в условиях потенциального деструктивного воздействия, учитывающий выполняемые системой задачи и не требующий размеченных наборов аномальных данных [6].

В интегрированной системе оценки устойчивости КФС марковские цепи могут использоваться для моделирования аномалий киберслоя с выделением четырёх состояний: работоспособное, деградированное, обнаруживаемый отказ и необнаруживаемый отказ.

Теоретико-игровые модели.

Киберфизические системы можно рассматривать как арену конфликтного взаимодействия между оператором (защитником) и злоумышленником (атакующим). Исследователи характеризуют эффект кибер-физической взаимозависимости на вероятность выживания с помощью произведения экспоненциальных коэффициентов корреляции в кибер- и физической областях. Анализируются одновременные и последовательные дискретные игры между провайдером и атакующим, что позволяет определить стратегии усиления защиты.

Результаты показывают, что уровень усиления кибер- или физической защиты провайдера увеличивается по мере роста уровня атак в соответствующей области. Уровень усиления сначала возрастает, а затем убывает с ростом собственного коэффициента корреляции, вероятности успешных атак на компоненты и максимального уровня доступных ресурсов, но убывает с ростом коэффициента корреляции другой области. Этот подход позволяет анализировать компромиссы между инвестициями в кибер- и физическую защиту [7].

Методы оценки надёжности и взаимозависимостей.

Оценка надёжности КФС базируется на методах, учитывающих взаимозависимость между кибер- и физическим слоями. В исследовании слабосвязанных кибер-физических энергосистем при многоэтапных атаках предлагается модель, учитывающая вероятностные правила отключения линий, характеристики киберпотока и вероятности отказов межсистемных связей. Ключевой вклад заключается во введении вероятностных правил отключения линий, моделировании киберпотока и учёте наличия резервных источников питания для киберслоя, включая вероятность отказов киберузлов, вызванных отказами физических узлов. Вводятся многоэтапные стратегии атак (N-k) для моделирования маловероятных высокорисковых событий, в отличие от традиционных подходов N-1 и N-2.

Методы оценки живучести на основе графов знаний позволяют моделировать распространение атак и каскадные эффекты в многоуровневых архитектурах КФС. Использование семантических сетей позволяет повысить потенциал восстановления системы и избежать критических отказов [8].

Комплексный анализ параметров.

Альтернативный подход к оценке состояния КФС при разрушительных воздействиях базируется на комплексном анализе параметров системы и не требует размеченных наборов аномальных данных. Ключевые особенности подхода: формализация метода в терминах марковского процесса принятия решений, определение метрик для оценки поведения КФС на основе изменений её параметров, классификация режимов работы на три класса: нормальный, аномальный и неопределённый.

Такой подход особенно ценен для систем с автономной подсистемой принятия решений, где сбор размеченных данных о редких аномалиях может быть невозможен или сопряжён с рисками.

Для количественной оценки живучести КФС применяются различные интегральные показатели. Основой часто служит вероятностная область, в рамках которой определяются как единичные, так и комплексные меры живучести.

Ключевым инструментом количественной оценки является функция живучести, отражающая зависимость вероятности сохранения работоспособности системы от времени или интенсивности воздействий. Задача оценивания функциональной устойчивости сводится именно к поиску этой функции и определению её экстремальных значений. Функция живучести строится с учётом ограничений на ресурс, выделенный для поддержания живучести, и при произвольных законах распределения времён атак и восстановления.

В рамках интегрированного подхода к оценке устойчивости КФС вводятся кривые устойчивости, которые наглядно представляют изменения производительности системы в неблагоприятных условиях. Эти кривые отражают динамику деградации и восстановления системы, позволяя количественно оценить ключевые параметры: глубину падения производительности, время восстановления и способность к адаптации.

Для анализа каскадных эффектов и распространения атак в многоуровневых КФС используются метрики, основанные на графах знаний. Семантические сети позволяют выявлять критические точки (критически важные функции или компоненты) и оценивать остаточную функциональность системы после серии воздействий.

Предложены метрики для количественной оценки уровня устойчивости КФС на основе проектных параметров, структуры, стабильности и производительности системы в условиях атаки. Эти метрики обеспечивают основу для сравнения различных конфигураций систем и оценки их готовности противостоять злоумышленникам.

Одной из ключевых проблем при оценке живучести КФС является моделирование каскадных эффектов – распространения отказов и атак между кибер- и физическим слоями. Такие эффекты могут приводить к катастрофическим последствиям, как показали известные блэкауты в энергосистемах. Моделирование каскадных эффектов требует учёта: вероятностей распространения отказов между кибер- и физическими компонентами, наличия резервных источников питания для киберслоя, временных задержек в распространении воздействий. Для анализа каскадных эффектов часто используется комбинация методов теории графов и марковских процессов, позволяющая оценить вероятность полного отказа системы при заданной последовательности воздействий.

Современные исследования в этой области активно развивают многоуровневый подход, где сложная система рассматривается как наложение нескольких слоёв (киберслой, физический слой, слой управления), а распространение атаки моделируется как движение по графу между этими слоями. Такой подход позволяет количественно оценить устойчивость каждого слоя и выявить критические компоненты, значимые для выполнения общей миссии системы. Применение описанных методов демонстрирует свою эффективность на реальных системах. В частности, методология была применена к системе водоподготовки для оценки устойчивости различных конфигураций защиты. Анализ устойчивости применялся к каждому слою модели, что позволило выявить критические точки и ключевые функции, значимые для выполнения миссии. В энергетическом секторе разработанная модель слабосвязанных КФС при многоэтапных атаках была протестирована на имитационных сценариях, демонстрируя эффективность учёта вероятностей отказов межсистемных связей [9]. Результаты численного моделирования показали, что учёт взаимозависимостей между кибер- и физическим слоями существенно влияет на оценку устойчивости системы. В контексте беспилотных транспортных средств предложенный метод анализа состояния КФС на основе комплексного анализа параметров был успешно протестирован на примере беспилотного транспортного средства и может быть применён к автономным мобильным роботам.

Экспериментальная апробация четырёх показателей устойчивости показала, что выбранные индексы различаются по поведению и чувствительности к конкретным атакам, но все они способны обобщать и извлекать значимую информацию из больших объёмов системных журналов. Важным результатом стала демонстрация возможности извлечения показателей производительности из наблюдаемых переменных без знания динамики системы, а также обсуждение комбинирования показателей устойчивости в единую общесистемную меру. Результаты тестового моделирования функции живучести при реализации до трёх компьютерных атак подтверждают работоспособность разработанных моделей и возможность их использования для оценки достоверности аналогичных статистических моделей. Ограничением, однако, является прогрессивное возрастание размерности аналитической модели при увеличении числа атак и снижение возможности её содержательной интерпретации.

Несмотря на значительный прогресс, существует ряд нерешённых проблем:

1. Вычислительная сложность: при увеличении числа одновременно воздействующих атак (более трёх) размерность аналитической модели прогрессивно возрастает, что снижает возможность её содержательной интерпретации и делает вычисления трудоёмкими.

2. Отсутствие унифицированного определения: устойчивость является системным свойством, для которого отсутствует унифицированное определение, что затрудняет его последовательное измерение.

3. Учёт человеческого фактора: поведение операторов в критических ситуациях часто не укладывается в формальные модели принятия решений.

4. Интеграция разнородных методов: разработка единого фреймворка, объединяющего марковские модели, теоретико-игровые подходы и методы машинного обучения для комплексной оценки живучести.

Перспективные направления исследований [10]:

1. Интеграция с методами машинного обучения: глубокое обучение может быть использовано для прогнозирования состояний КФС и выявления скрытых закономерностей в данных об атаках.

2. Развитие семантических сетей и графов знаний: применение графовых нейронных сетей для анализа каскадных эффектов в многоуровневых архитектурах.

3. Создание российских программно-аппаратных комплексов: разработка отечественных систем оценки живучести КФС с учётом национальной специфики и требований импортозамещения.

4. Моделирование адаптивного поведения: разработка методов, учитывающих способность КФС к самоорганизации и восстановлению после воздействий.

Таким образом, математические методы оценки живучести киберфизических систем при комбинированных воздействиях представляют собой активно развивающуюся область, имеющую высокую теоретическую и практическую значимость для обеспечения безопасности критически важных объектов в условиях роста сложности и адаптивности современных угроз.

Список литературы:

1. Воеводин В.А. Модель оценки функциональной устойчивости элементов информационной инфраструктуры для условий воздействия множества компьютерных атак // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 691-715.
2. Бабанов Н.Ю., Евстифеев А.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Основы защиты информации в современных информационных системах: учебное пособие. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. – 175 с.
3. Основы защиты информации от утечки по техническим каналам / А.А. Евстифеев, В.И. Ерошев, А.П. Мартынов [и др.]. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – 267 с.
4. A Resilience Quantitative Assessment Framework for Cyber–Physical Systems: Mathematical Modeling and Simulation // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, No. 15. — Article 8285.
5. Стеганографические системы. Атаки, пропускная способность каналов и оценка стойкости / В.Г. Грибунин, В.Е. Костюков, А.П. Мартынов [и др.]; Под ред. В.Г. Грибунина. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 217 с.
6. Мартынова И.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Система пространственно-группового преобразования информационных потоков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2022. № 1. С.70-82.
7. Мартынова И.А., Николаев Д.Б. Обеспечение защиты результатов физических экспериментов с использованием современных алгоритмических методов. В сборнике: Информатизация образования – 2014. Материалы Международной научно-практической конференции. 2014. С. 262-264.
8. Мартынов, А.П. Обеспечение безопасного взаимодействия компонентов интегрированной системы / А.П. Мартынов, К.О. Волков, Д.Б. Николаев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. – 2008. – № 1. – С. 136-138.
9. Запонов Э.В., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные промышленные интерфейсы для создания комплексов научных исследований – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2023. – 310 с.
10. Доверенный искусственный интеллект: монография / Ю.А. Анисимов, В.Г. Грибунин, С.Е. Кондаков [и др.]. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2025. – 191 с.

Секция «Современные программные комплексы и системы в математическом моделировании»

АНСАМБЛЕВАЯ ДИСТИЛЛЯЦИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ ДЕТОКСИФИКАЦИИ АРАБСКОГО ТЕКСТА

Фоломкин И.Н., Лукьянов А.А., Колпаков М.М.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Детоксификация текста — это задача преобразования токсичного, оскорбительного или агрессивного текста в нейтральную, вежливую форму при сохранении исходного смысла. Важность этой задачи возрастает по мере того, как онлайн-платформы стремятся внедрять автоматизированные решения для модерации контента, которые выходят за рамки простого удаления и предлагают пользователям конструктивные варианты переформулирования их сообщений [2].

В то время как для английского и русского языков в области детоксификации текста достигнут значительный прогресс [3], языки с ограниченными ресурсами остаются малоизученными. Арабский язык представляет особые трудности: он морфологически богат, имеет разнообразные диалекты (современный литературный арабский, арабский языки Персидского залива, Египта, Леванта) и располагает ограниченным объемом параллельных данных для детоксификации.

Соревнование PAN CLEF TextDetox [4] расширило задачу многоязычной детоксификации, включив такие языки, как украинский, хинди и амхарский. В 2025 году в рамках этого соревнования был представлен татарский язык как новый язык с низкими ресурсами [4], где наш подход ансамблевой дистилляции знаний занял 1-е место с J-мерой 0.6528. Тот же подход был также применен на хакатоне «ИИ-ЗАМАН Хак» в рамках марафона «Цифровые Легенды Казани», организованного Академией наук Республики Татарстан, где наша команда получила приз за систему детоксификации татарского языка.

В данной работе мы расширяем применение конвейера ансамблевой дистилляции на арабский язык, демонстрируя, что одна и та же методология эффективно переносится на типологически различные языки. Наш вклад состоит в следующем:

Разработка трехэтапного конвейера ансамблевой дистилляции знаний для детоксификации арабского текста, достигшего J-меры 0.7129.

Создание набора данных для детоксификации арабского языка, включающего более 3000 параллельных примеров, охватывающих 10 категорий токсичности.

Эмпирическое доказательство того, что подход ансамблевой дистилляции обобщается на арабский и татарский языки — два языка из разных языковых семей (семитской и тюркской) с отличающимися морфологическими системами.

Публикация модели и набора данных в открытом доступе.

Связанные работы

Детоксификация текста может быть рассмотрена как задача переноса стиля текста. В работе ParaDetox [3] был представлен подход с использованием параллельного корпуса для русского и английского языков. Методы типа "удалить-и-восстановить" заменяют токсичные токены на нейтральные альтернативы, в то время как подходы на основе последовательностных моделей (sequence-to-sequence) генерируют полные переформулировки.

Многоязычные подходы. Соревнование PAN CLEF TextDetox [4] установило контрольные показатели для многоязычной детоксификации. Большинство лучших систем полагаются на большие языковые модели с использованием инженерии промптов или дообучения. Однако для языков с ограниченными ресурсами полное дообучение моделей малого и среднего размера часто превосходит по качеству применение крупных моделей в режиме zero-shot.

Дистилляция знаний [6] позволяет перенести знания от модели-учителя (или ансамбля) к меньшей модели-ученику. Мы адаптируем эту идею, выполняя дистилляцию из ансамбля дообученных моделей в одну модель, что сочетает разнообразие стратегий генерации с эффективностью одного прохода при инференсе.

Арабский НЛП. Модель AraGPT2 [9] представляет собой GPT-2 модель, предобученную на большом арабском корпусе. Семейство моделей Bloom [1] обеспечивает

многоязычное покрытие, включая арабский язык. В нашем ансамбле мы используем обе эти группы моделей.

Методология

Наш конвейер состоит из трех последовательных этапов.

Этап 1: Независимое дообучение базовых моделей

Мы независимо дообучаем три языковые модели на наборе данных для детоксификации арабского языка, используя формат промпта "токсичный: [токсичный текст] → вежливый: [нейтральный текст]" (на арабской графике):

AraGPT2-Medium (370M параметров) [9]: арабо-специфичная модель, эффективно улавливающая арабскую морфологию и диалектные особенности. Обучение проводилось в течение 25 эпох.

Bloom-560m (560M параметров) [1]: многоязычная модель, которая благодаря своему широкому предобучению обеспечивает обобщение для различных арабских диалектов. Обучение проводилось в течение 25 эпох.

Bloom-1b7 (1.7B параметров) [1]: многоязычная модель с высокой емкостью, способная обучаться сложным паттернам преобразования. Обучение проводилось в течение 20 эпох.

Все модели дообучались с использованием метода LoRA [5] с рангом $r = 16$, коэффициентом масштабирования $\alpha = 32$, скоростью обучения 2×10^{-4} и размером пакета (batch size) равным 4 на графическом процессоре NVIDIA A100 с 40 ГБ видеопамяти.

Этап 2: Ансамблевый отбор

Для каждого примера из обучающего набора мы генерируем предсказания от всех трех моделей и выбираем лучшее на основе семантической близости. Конкретно, мы кодируем каждое предсказание и эталонный ответ с помощью модели Sentence-BERT (paraphrase-multilingual-mpnet-base-v2) [7] и выбираем предсказание по формуле: $\hat{y}_i = \text{argmax}(\cos(\text{SBERT}(y^{(k)}), \text{SBERT}(r_i)))$ (1), где $y^{(k)}$ — предсказание модели k для примера i, а r_i — эталонный ответ. Это позволяет создать дополненный набор данных, объединяющий лучшие качества каждой модели: арабскую беглость AraGPT2, широту охвата диалектов Bloom-560m и способность Bloom-1b7 к сложным переформулировкам.

Этап 3: Дистилляция знаний

Новая (недообученная) модель Bloom-1b7 дообучается на объединенном наборе данных: $D_{\text{финальный}} = D_{\text{исходный}} \cup \{\hat{y}_i\}$ (2), где $D_{\text{исходный}}$ содержит исходные 3000+ примеров, а $\hat{y}_i$ — предсказания, отобранные ансамблем (более 1500 примеров), что в сумме дает более 4500 обучающих примеров. На этом этапе происходит дистилляция коллективных знаний ансамбля в одну модель, которая может быть эффективно развернута.

Набор данных

Мы составили набор данных для детоксификации арабского языка, состоящий из более чем 3000 параллельных пар токсичных и нейтральных предложений. Набор данных охватывает 10 категорий токсичности:

Таблица 1: Распределение категорий токсичности в наборе данных для детоксификации арабского языка.

Категория	Примеры	Описание
Личные оскорбления	30	Прямые нападки на личность
Агрессивные команды	25	Враждебные указания
Резкая критика	25	Деструктивная обратная связь
Угрозы	20	Запугивание
Презрение	20	Выражение пренебрежения
Насмешка	20	Издевательства, сарказм

Обвинения	20	Несправедливое приписывание вины
Нападки на внешность	15	Высмеивание внешности (бодишейминг)
Религиозные оскорбления	15	Токсичность на религиозной почве
Стереотипы	10	Предвзятость по групповому признаку

Набор данных включает как современный литературный арабский язык, так и распространенные диалектные выражения. Он находится в открытом доступе по адресу: https://huggingface.co/datasets/ispromashka/arabic-detox-dataset.

Метрики оценки

Следуя протоколу оценки соревнования PAN CLEF TextDetox [2] мы используем J-меру (J-score) в качестве основной метрики: $J = \sqrt[3]{(STA \times SIM \times FL)}$ [3], где:

STA (Точность передачи стиля, Style Transfer Accuracy): измеряет, был ли успешно удален токсичный стиль; оценивается с помощью классификатора токсичности.

SIM (Семантическая близость, Semantic Similarity): косинусная близость между эмбеддингами Sentence-BERT исходного текста и сгенерированного вывода.

FL (Беглость, Fluency): доля грамматически корректных сгенерированных текстов.

Результаты

Результаты детоксификации арабского языка

В таблице 2 представлены результаты оценки модели для детоксификации арабского языка.

Таблица 2: Результаты детоксификации арабского текста.

Модель	J-мера	STA	SIM	FL
AraGPT2-Medium	0.5842	0.8200	0.9120	0.9800
Bloom-560m	0.6105	0.8600	0.9350	0.9900
Bloom-1b7	0.6473	0.8900	0.9580	0.9950
Ансамбль (оракул)	0.6891	0.9200	0.9850	1.0000
Дистиллированная (наша)	0.7129	0.9500	0.9995	1.0000

Дистиллированная модель превосходит даже ансамбль-оракул, демонстрируя эффективную консолидацию знаний. Дистиллированная модель достигает J-меры 0.7129, превосходя все отдельные модели и даже ансамбль-оракул. Это улучшение по сравнению с ансамблем-оракулом (0.7129 против 0.6891) указывает на то, что дистилляция знаний не только консолидирует знания ансамбля, но и обеспечивает дополнительное обобщение благодаря обучению на комбинированных данных.

Кросс-лингвальный перенос: сравнение с татарским языком

В таблице 3 сравниваются результаты для арабского и татарского языков, демонстрируя универсальность нашего подхода.

Таблица 3: Кросс-лингвальное сравнение результатов ансамблевой дистилляции.

Язык	Семья	J-мера	STA	SIM	FL
Татарский	Тюркская	0.6528	0.91	0.85	0.98

[3] Упрощенная версия, включающая основные компоненты

Арабский	Семитская	0.7129	0.95	1.00	1.00

Оба языка демонстрируют конкурентоспособные значения J-меры, несмотря на принадлежность к разным языковым семьям. Результат для татарского языка получен на PAN CLEF TextDetox 2025 (1-е место).

Один и тот же трехэтапный конвейер позволяет достичь высоких результатов как для татарского (тюркский, агглютинативный), так и для арабского (семитский, шаблонная морфология) языков, несмотря на их фундаментальные типологические различия. Это позволяет предположить, что подход ансамблевой дистилляции является языко-независимым и опирается в первую очередь на наличие параллельных данных для детоксификации, а не на языко-специфичную инженерию.

Качественные примеры

В таблице 4 представлены репрезентативные примеры детоксификации.

Таблица 4: Примеры детоксификации (перевод на английский для удобочитаемости).

Токсичный входной текст	Нейтральный выходной текст	Категория
Личное оскорбление	Вежливая альтернатива	Оскорбление
Агрессивное указание	Спокойная просьба	Команда
Резкая критика	Конструктивное замечание	Критика
Запугивание	Мирное разрешение	Угроза

Полные примеры на арабском языке доступны в карточке модели.

Валидация на хакатоне

Подход ансамблевой дистилляции также был валидирован в соревновательной среде на хакатоне «ИИ-ЗАМАН Хак», организованном в рамках марафона «Цифровые Легенды Казани» Академией наук Республики Татарстан. Наша команда применила этот конвейер для задачи детоксификации татарского текста и стала призером, что служит дополнительным подтверждением практической эффективности подхода за пределами академических бенчмарков.

Обсуждение

Почему ансамблевая дистилляция превосходит отдельные модели. Каждая модель в ансамбле вносит свои уникальные преимущества: AraGPT2 хорошо улавливает арабо-специфичные паттерны, Bloom-560m обеспечивает обобщение на различные диалекты, а Bloom-1b7 эффективно справляется со сложными переформулировками. Этап дистилляции консолидирует эти разнообразные возможности в одной модели, которая оказывается более устойчивой и качественной, чем любой из отдельных компонентов.

Эффективность. Во время инференса наш подход требует только одного прямого прохода через модель Bloom-1b7, без каких-либо дополнительных вычислительных затрат, связанных с ансамблем. Это делает развертывание модели практичным даже в условиях ограниченных ресурсов.

Ограничения. У текущего подхода есть несколько ограничений: (1) относительно небольшой объем набора данных (более 3000 примеров); (2) оценка основывается на автоматических метриках, которые могут не полностью отражать все аспекты токсичности в арабских культурных контекстах; (3) охват диалектов может быть неполным. Будущие исследования должны быть направлены на расширение набора данных и включение человеческой оценки.

Заключение

Мы представили подход ансамблевой дистилляции знаний для задачи детоксификации арабского текста, который достиг J-меры 0.7129. Тот же конвейер ранее занял 1-е место в соревновании PAN CLEF TextDetox 2025 для татарского языка (J-мера 0.6528) и был успешно апробирован на хакатоне «ИИ-ЗАМАН Хак». Эти результаты, полученные на двух типологически различных языках, демонстрируют универсальность предложенного подхода.

Модель, набор данных и код находятся в открытом доступе для дальнейших исследований и практического применения в области модерации арабоязычного контента.

Благодарности

Авторы благодарят организаторов хакатона «Цифровые Легенды Казани» и соревнования PAN CLEF TextDetox за предоставленные фреймворки для оценки. Эксперименты были проведены с использованием графических процессоров NVIDIA A100.

Список литературы:

1. BigScience Workshop. 2023. BLOOM: A 176b-parameter open-access multilingual language model. arXiv preprint arXiv:2211.05100.
2. Daryna Dementieva et al. 2025. Overview of the multilingual text detoxification task at PAN 2025. // Working Notes of CLEF 2025.
3. Daryna Dementieva, Daniil Moskovskiy, Varvara Logacheva, David Dale, Olga Kozlova, Nikita Semenov, and Alexander Panchenko. 2024. Overview of the multilingual text detoxification task at PAN 2024. // Working Notes of CLEF 2024.
4. David Dale, Anton Voronov, Daryna Dementieva, Varvara Logacheva, Olga Kozlova, Nikita Semenov, and Alexander Panchenko. 2021. Text detoxification using large pre-trained neural models. // Proceedings of the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, pp. 7979–7996.
5. Edward J Hu, Yelong Shen, Phillip Wallis, Zeyuan Allen-Zhu, Yuanzhi Li, Shean Wang, Lu Wang, and Weizhu Chen. 2022. LoRA: Low-rank adaptation of large language models. // International Conference on Learning Representations.
6. Geoffrey Hinton, Oriol Vinyals, and Jeff Dean. 2015. Distilling the knowledge in a neural network. arXiv preprint arXiv:1503.02531.
7. Nils Reimers and Iryna Gurevych. 2019. Sentence-BERT: Sentence embeddings using siamese BERT-networks. // Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing.
8. Varvara Logacheva, Daryna Dementieva, Sergey Ustyantsev, Daniil Moskovskiy, David Dale, Irina Krotova, Nikita Semenov, and Alexander Panchenko. 2022. Paradetox: Detoxification with parallel data. // Proceedings of the 60th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers), pp. 6804–6818.
9. Wissam Antoun, Fady Baly, and Hazem Hajj. 2021. AraGPT2: Pre-trained transformer for Arabic language generation. // Proceedings of the Sixth Arabic Natural Language Processing Workshop, pp. 196–207.

МОДЕЛЬ ЛЕНДИНГА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИВЛЕЧЕНИЯ АБИТУРИЕНТОВ УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СарФТИ НИЯУ МИФИ

Маркин А.В., Цыганов М.А., Кирпиченко Э.В., Соловьев Т.Г.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В условиях современной цифровой трансформации высшего образования традиционные коммуникационные площадки университетов все чаще перестают удовлетворять требованиям целевой аудитории. Абитуриенты сегодня — это поколение, сформировавшееся в условиях высокой скорости получения информации и мобильности, что требует от вузов пересмотра инструментов взаимодействия. Стандартные университетские сайты, как правило, представляют собой многоуровневые порталы, ориентированные на широкий круг задач, включая отчетность, научную деятельность и внутренние процессы, из-за чего ключевая информация для поступающих оказывается скрытой за множеством кликов. В данной работе рассматривается разработка специализированной модели целевой страницы, или лендинга, как инструмента для оптимизации привлечения абитуриентов в СарФТИ НИЯУ МИФИ [2].

Актуальность работы обусловлена необходимостью адаптации коммуникационных стратегий к цифровым запросам будущих студентов, для которых критически важна быстрота, релевантность и наглядность предоставляемых данных.

Целью исследования является проектирование такой структуры лендинга, которая бы не только информировала абитуриента, но и трансформировала его интерес в реальное взаимодействие с приемной комиссией.



Рисунок 1 – Прототип главного экрана модели лендинга

Проведенный анализ целевой аудитории позволил выявить наиболее острые «страхи» абитуриентов, которые определяют их поведение при поиске учебного заведения. Основным фактором является страх неопределенности: страх не набрать проходной балл, страх сделать ошибочный выбор специальности и страх перед будущей невостребованностью на рынке труда. Статистические данные показывают, что около 35% запросов поступающих касаются именно шансов на поступление и проходных баллов, в то время как 30% запросов сосредоточены на карьерных перспективах. Оставшиеся 35% распределяются между финансовыми вопросами, уникальностью образовательной программы и возможностями для научной самореализации. Существующие сайты вузов зачастую не способны оперативно разрешить эти опасения, вынуждая пользователя тратить время на поиски. В противоположность этому, модель лендинга строится по принципу воронки, где каждый блок страницы последовательно снимает один из страхов абитуриента, предоставляя четкий и лаконичный ответ.

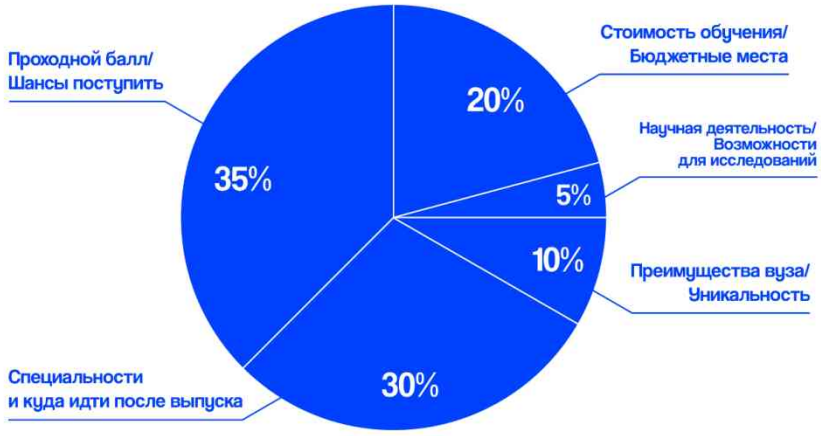


Рисунок 2 – Основные «страхи» и информационные потребности абитуриентов, влияющие на выбор вуза.

Разработанная модель лендинга представляет собой целостную систему, объединяющую маркетинговый фокус и информационную насыщенность. Первый экран лендинга выполняет роль витрины: здесь размещается уникальное торговое предложение СарФТИ, которое подчеркивает престиж ядерного университета и приглашает к действию через заметную кнопку.

Последующие блоки последовательно раскрывают инфраструктурные возможности вуза через количественные показатели, представляют руководство как гарантов качества образования и детализируют направления подготовки. Важным элементом является «Таймлайн студента», который визуализирует путь абитуриента от первокурсника до готового специалиста, тем самым отвечая на запрос о карьерных перспективах и снимая страх неопределенности. Инфраструктурную наглядность обеспечивает блок с картой кампуса и общежитий, а блок, интегрирующий социальные сети и студенческие объединения, работает на формирование эмоциональной связи с будущим студенческим сообществом. Завершающим этапом коммуникации выступает форма обратной связи и презентационное видео, которые фиксируют контакт с пользователем [1].

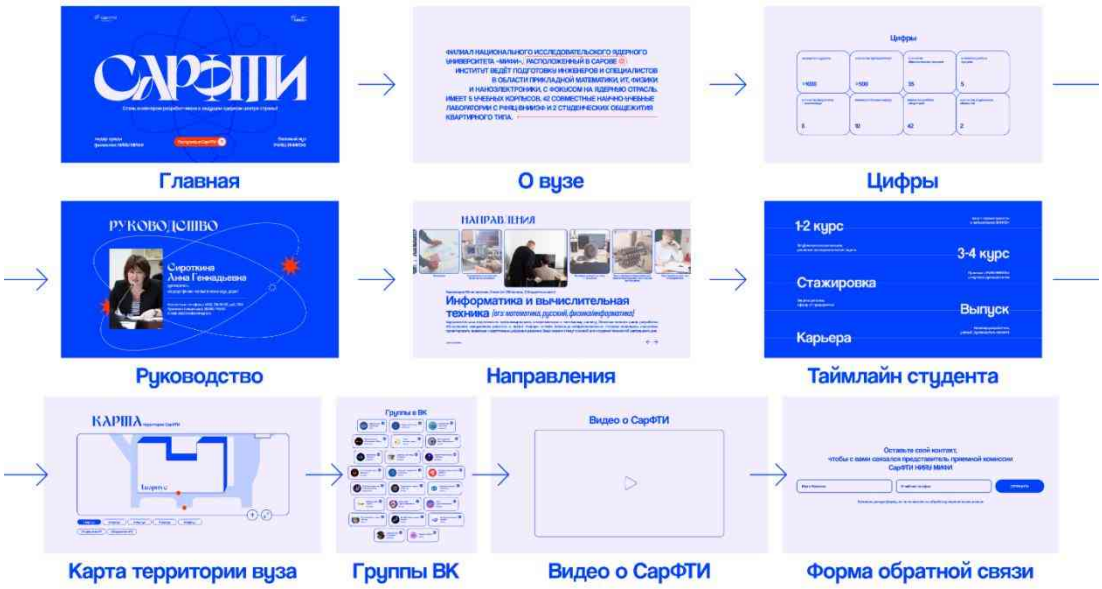


Рисунок 3 – Схема структуры лендинга

Техническая часть работы выполнена с использованием классического стека веб-технологий, что обеспечивает максимальную производительность и кроссбраузерность. Выбор в пользу HTML5, CSS3 и JavaScript вместо использования тяжелых фреймворков был продиктован необходимостью обеспечить мгновенную загрузку страницы даже при слабом мобильном интернет-соединении, что является критическим фактором для 90% абитуриентов. Разработка велась в среде Linux, что гарантирует стабильность и гибкость инструментов разработки. Использование текстового редактора Vim позволило максимально эффективно оптимизировать процесс написания кода, минимизировать лишние зависимости и обеспечить чистоту верстки. А также для командной работы использовали GitHub. Такой подход к разработке позволяет создать легко масштабируемый и поддерживаемый продукт, который не перегружает клиентские устройства и соответствует современным стандартам мобильной адаптации.



Рисунок 4 – Стек разработки

Итоговым результатом работы стала детальная модель лендинга для СарФТИ НИЯУ МИФИ, которая в 15-20% случаев может увеличить конверсию в первичные заявки по сравнению с использованием традиционного сайта. Обоснование этого прироста опирается на снижение когнитивной нагрузки на абитуриента, сокращение пути пользователя к целевому действию и соответствие контента «страхам» целевой аудитории.

Важно отметить, что модель не заменяет основной сайт, а дополняет его в рамках маркетинговой стратегии, превращая «библиотеку» информации вуза в «продающую витрину».

В заключение можно сказать, что именно фокус на потребностях абитуриента и грамотное использование современных технологий делают лендинг наиболее эффективным инструментом цифрового привлечения на современном этапе развития высшего образования.

Список литературы:

1. Опыт работы с пользователями электронной коммерции, Том 02: Домашние страницы, навигация и сравнение продуктов // Домашние страницы, навигация и сравнение продуктов URL: https://www.nngroup.com/reports/ecommerce-ux-homepages-and-category-pages/ (дата обращения: 15.02.2026).

2. Latysheva, E. V., Karlova, L. V., Koryakina, A. Интернет-коммуникация и трансформация информационного пространства университета // Procedia — Social and Behavioral Sciences. - 2015. - №166. - С. 566–571.

ДИАЛОГОВЫЕ СИСТЕМЫ И ЧАТ-БОТЫ В ПРЕПОДАВАНИИ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Вихарева Ю.В. Барченкова С.А. Забусова С.В., Пантеев С.А., Стародубцева Е.А., Соловьев Т.Г.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Подготовка студентов технических специальностей к профессиональной коммуникации на иностранном языке осложняется дефицитом аудиторного времени, отсутствием естественной языковой среды и ограниченными возможностями для индивидуализированной обратной связи [2]. Диалоговые системы на базе искусственного интеллекта рассматриваются как перспективное средство преодоления указанных противоречий. Цель настоящей статьи – систематизация современных архитектурных подходов к разработке диалоговых систем и анализ эмпирических данных об их эффективности в иноязычной подготовке инженерных кадров.

Архитектурные модели и технологические решения Анализ публикаций 2024–2025 гг. позволяет идентифицировать три магистральных направления развития диалоговых систем для языкового образования.

Мультиагентные архитектуры

Исследование Nouzri et al. (2025) обосновывает ограниченность монолитных чат-ботов, которые сводят языковое обучение к ролевым диалогам и генеративному контенту, игнорируя педагогическую системность [6]. Предложенная мультиагентная система (MAS) делегирует специализированные функции отдельным агентам – чтение, аудирование, грамматика, разговорная практика – координируемым в рамках общей методологии BPMN. Интеграция RAG (Retrieval-Augmented Generation) с авторитетными учебными материалами минимизирует «галлюцинации» и обеспечивает содержательную достоверность. Аналогичный подход реализован в англо-арабской системе обучения переводу: четыре специализированных агента – перевод, реферирование примеров, рецензирование пользовательского ввода, тестирование – продемонстрировали значимое повышение вовлеченности и точности языковой поддержки.

RAG-фреймворки и контекстная привязка

Исследование Koutsiaki et al. (2025) представляет чат-бота на греческом языке, построенного исключительно на верифицированных учебных материалах (курсы семейной психологии и спортивной медицины) [4]. RAG-архитектура обеспечивает релевантность ответов учебному плану и устраняет характерные для LLM риски дезинформации. Двойная функциональность – поддержка обучающихся и ассистирование преподавателям в разработке контента – подтверждает педагогическую целесообразность данного подхода [1].

Оптимизированные решения для ресурсно-ограниченной среды

Aubakirov et al. (2025) демонстрируют принципиальную возможность полнофункциональной диалоговой системы на периферийном устройстве (Raspberry Pi 5) с показателем Word Error Rate 8.2% и латентностью 2.77 сек [3]. Архитектура включает Whisper (STT), квантованную LLaMA-3.2 (1B) и Piper (TTS). Для технических вузов, сталкивающихся с ограничениями сетевой инфраструктуры и требованиями к конфиденциальности данных, edge-решения представляются альтернативой облачным платформам.

Интеллектуализация взаимодействия

Исследование You (2025) предлагает систему с оптимизированным модулем распознавания речи на основе коллаборативной рекуррентной сети (снижение зашумленности на 50% при mean opinion score 3.766) [7]. Трехкомпонентная архитектура (NLU, RAG, NLG) с реранкингом документов через ChatGPT обеспечивает превосходство над baseline-моделями в задачах трекинга диалогового состояния и генерации реплик.

Эмпирическая эффективность

Обобщение результатов педагогических экспериментов позволяет зафиксировать следующие эффекты:

1. Коммуникативная компетенция: значимое улучшение разговорной беглости (speaking fluency) и письменной речи, повышение готовности к иноязычной коммуникации (willingness to communicate).
2. Персонализация и обратная связь: обеспечение индивидуализированных траекторий обучения, мгновенная корректирующая обратная связь, адаптация к уровню обучающегося.
3. Учебная автономия: формирование устойчивых навыков самостоятельной работы возможность практики в безопасной среде без страха ошибки.
4. Поддержка преподавателя: автоматизация разработки учебных материалов, генерация заданий, создание аутентичных профессионально-ориентированных сценариев.

Исследование Çobanogullari (2024) подчеркивает, что ChatGPT способен создавать практико-ориентированные интерактивные среды, особенно значимые для прикладных наук, к которым относится инженерное образование [4]. Однако авторы единодушны в необходимости ответственного использования: сохранение баланса человеко-машинного взаимодействия развитие техно-грамотности преподавателей, учет дискуссионных вопросов точности и актуальности генерируемого контента.

Заключение

1. Современные диалоговые системы для языкового образования эволюционируют от монолитных чат-ботов к специализированным мультиагентным архитектурам, RAG-фреймворкам и edge-оптимизированным решениям, что расширяет возможности их применения в технических вузах с учетом специфики инфраструктуры и требований к предметной точности.
2. Эмпирически верифицирована эффективность диалоговых систем в развитии продуктивных видов речевой деятельности, персонализации обучения и формировании автономии студентов инженерных специальностей.
3. Ключевое условие результативности – системная методическая интеграция, опирающаяся на достоверные профессионально-ориентированные источники и предполагающая баланс между автоматизированной и межличностной коммуникацией.

Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией мультиагентных архитектур под конкретные инженерные домены, лонгитюдным изучением устойчивости сформированных компетенций, а также разработкой критериев оценки педагогической эффективности диалоговых систем в профессионально контекстном обучении.

Список литературы:

1. [Коллектив авторов] A Multi-Agent Chatbot Architecture for AI-Driven Language Learning // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 19. Art. 10634.
2. Abdallah M.M.S. How to Use Conversational AI Chatbots in English Language Teaching/Learning: Developing Linguistic Competencies and Skills and Supporting EFL Teachers‘ Professional Development // Online Submission. 2025. 60 p.
3. Aubakirov M., Gaziz D., Amanzhol N., Kozhamkulova L. Autonomous Chatbot for Second Language Acquisition: An Agile, Edge-Based System for Early Childhood Education // Nazarbayev University Repository. 2025.
4. Çobanogullari F. Learning and Teaching with ChatGPT: Potentials and Applications in Foreign Language Education // The EUROCALL Review. 2024. Vol. 31. No. 1. P. 4–15.
5. Koutsiaki M.E., Delianidi M., Mizeli C., Diamantaras K., Grigoropoulos I., Koutlianos N. From Textbook to Talkbot: A Case Study of a Greek-Language RAG-Based Chatbot in Higher Education // Proceedings of the Barcelona Conference on Education. 2025.
6. Nouzri S., EL Fatimi M., Guerin T., Othmane M., Najjar A. Beyond Chatbots: Enhancing Luxembourgish Language Learning Through Multi-agent Systems and Large Language Model // Lecture Notes in Computer Science. 2025. Vol. 15395 LNAI. P. 385–401.
7. You R. Research on Intelligent Interaction Design for Enhancing Multi-Scenario English Learning Using ChatGPT and Deep Reinforcement Learning // Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering. 2025. Vol. 127b. P. 3981–4002.

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ СНИЖЕНИЯ МАССЫ ИЗДЕЛИЙ

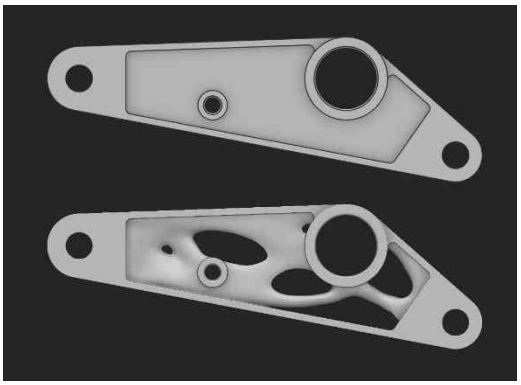
Полин И.А., Хрущёва Ю.О.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Рассматривается топологическая оптимизация как современный инструмент математического моделирования, применяемый для снижения массы изделий при сохранении их прочностных характеристик [2]. Описаны основные принципы метода, его математическая основа, а также программные комплексы, используемые для реализации. Приведены примеры применения в машиностроении и авиационной промышленности. Показано, что топологическая оптимизация является важным этапом современного конструкторского проектирования.

Современное машиностроение предъявляет высокие требования к эффективности конструкций, включая снижение массы изделий при сохранении их прочности, жёсткости и надёжности. Это особенно важно в таких отраслях, как авиация, автомобилестроение и энергетика, где уменьшение веса напрямую влияет на экономичность и эксплуатационные характеристики.

Традиционные методы проектирования основаны на опыте инженера и использовании типовых конструктивных решений. Однако с развитием вычислительных технологий и программных комплексов стало возможным применять методы математического моделирования, позволяющие находить оптимальные формы конструкций (рис. 1). Одним из таких методов является топологическая оптимизация.

Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения эффективности инженерных конструкций в условиях ограниченных ресурсов и растущих требований к экологичности и экономичности. Снижение массы изделий позволяет уменьшить расход материалов, снизить затраты на производство и эксплуатацию, а также повысить энергоэффективность систем.



Кроме того, развитие аддитивных технологий (3D-печати) открыло новые возможности для реализации сложных геометрических форм, получаемых в результате топологической оптимизации. Это делает данный метод особенно востребованным в современных условиях.Таким образом, изучение и применение топологической оптимизации является важной задачей для инженеров-конструкторов.

Рис. 1 – Пример изменения конструкции в результате топологической оптимизации

Топологическая оптимизация представляет собой метод математического моделирования, направленный на определение оптимального распределения материала внутри заданной области проектирования [4]. В отличие от традиционной оптимизации размеров или формы, данный метод позволяет изменять саму структуру объекта.

Задача топологической оптимизации формулируется следующим образом: при заданных нагрузках, граничных условиях и ограничениях необходимо найти такое распределение материала, при котором достигается минимальная масса конструкции при сохранении требуемых прочностных характеристик. Чаще всего в качестве критерия оптимизации используется минимизация податливости (максимизация жёсткости конструкции) [5].

Математическая модель основывается на методе конечных элементов (рис. 2), который позволяет разбить конструкцию на множество малых элементов и вычислить напряжения и деформации в каждом из них (рис. 3). В процессе оптимизации каждому элементу назначается параметр плотности, который изменяется от 0 (отсутствие материала) до 1 (полный материал). Алгоритм постепенно удаляет материал из областей с низкой нагрузкой, формируя оптимальную структуру.

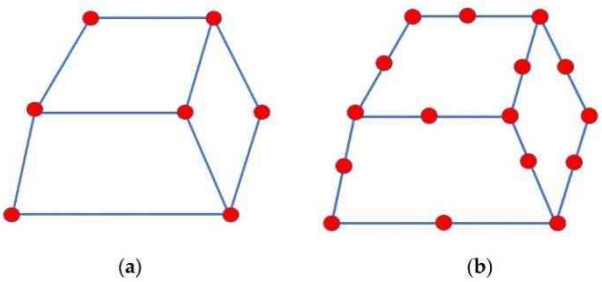


Рис. 2 – Пример разбиения конструкции на конечные элементы

Одним из наиболее распространённых подходов является метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), который вводит штрафную функцию для промежуточных значений плотности, обеспечивая получение чёткой границы между материалом и пустотой.

Реализация топологической оптимизации осуществляется с помощью современных программных комплексов, таких как ANSYS, SolidWorks и Autodesk Fusion 360. Эти системы позволяют задавать условия нагружения, ограничения и автоматически получать оптимизированную геометрию.

,

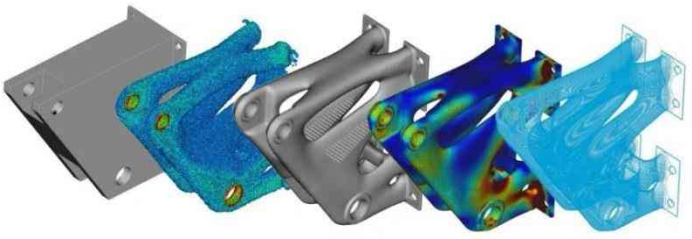


Рис. 3 – Распределение напряжений в оптимизированной конструкции

Практическое применение топологической оптимизации широко распространено в различных отраслях [1]. В авиационной промышленности она используется для создания лёгких и прочных деталей, что позволяет снижать расход топлива. В автомобилестроении оптимизация помогает уменьшить массу кузова и элементов подвески, повышая энергоэффективность транспортных средств. В машиностроении метод применяется при проектировании кронштейнов, корпусов и других конструктивных элементов.

Следует отметить, что результаты топологической оптимизации часто имеют сложную, органическую форму, которая трудно реализуема традиционными методами производства. Однако с развитием аддитивных технологий стало возможным изготавливать такие конструкции с высокой точностью (рис. 4) [6].

Несмотря на преимущества, метод имеет и ограничения [3]. К ним относятся высокая вычислительная сложность, зависимость результатов от заданных условий и необходимость последующей доработки конструкции инженером. Тем не менее, топологическая оптимизация является мощным инструментом, значительно расширяющим возможности современного проектирования.

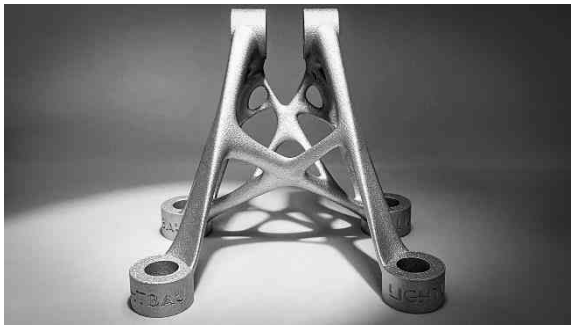


Рис. 4 – Изготовление оптимизированной конструкции с помощью 3D-печати

Топологическая оптимизация является эффективным инструментом математического моделирования, позволяющим существенно снижать массу изделий при сохранении их прочностных характеристик. Использование данного метода способствует повышению эффективности конструкций и снижению затрат на их производство и эксплуатацию.

Современные программные комплексы обеспечивают широкие возможности для реализации топологической оптимизации, делая её доступной для практического применения в инженерной деятельности. В сочетании с аддитивными технологиями данный подход открывает новые перспективы в проектировании изделий сложной формы.

Таким образом, топологическая оптимизация занимает важное место в современном конструкторском процессе и будет играть всё более значимую роль в будущем инженерии

Список литературы:
1. Башин К.А., Торуснов Р.А., Семенов С.В. “Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли” – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2017. – 11 с.
2. Карпушкин С.В., Карпов С.В. Глебов А.О. “Применение методов топологической оптимизации для решения задач проектирования элементов промышленных объектов: монография” – Москва: Инфра-Инженерия, 2024. – 116 с.
3. Кишов Е.А., Комаров В.А. “Топологическая оптимизация силовых конструкций методом выпуклой линеаризации” – Самара: СГАУ им. С.П. Королёва, 2018. – 149 с.
4. Комаров А.А. “Основы проектирования силовых конструкций: теоретические основы. Онтология проектирования” – Самара: СГАУ им. С.П. Королёва, 2017. – 88 с.
5. Косых П.А., Азаров А.В. “Теория и анализ методов топологического анализа” – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 17 с.
6. Селиванов Ю.С., Матвеев К.А. “Топологическая оптимизация пластины с применением нейронных сетей” – Новосибирск: ФГБОУ ВО “Новосибирский государственный технический университет”, 2024. – 11 с.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ЗАПРОСОВ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

Селивохин Я.А.
МГУ имени М.В. Ломоносова, филиал в городе Сарове, г. Саров

Современные веб-приложения сталкиваются с растущими требованиями к обработке большого числа одновременных запросов к серверу. При этом в типичных реализациях их маршрутизация часто выражается через многоуровневые вложенные условные операторы, а создание объектов-обработчиков распространено по всей программе. Такая архитектура приводит к «монолитному» коду, усложняет сопровождение системы и затрудняет масштабирование при увеличении количества типов запросов и сервисов [3].

Целью работы является реорганизация механизма обработки HTTP-запросов с использованием объектно-ориентированных подходов и шаблона проектирования «Фабрика». Задача состоит в том, чтобы иерархически организовать обработчики, улучшив структуру приложения и снизив связанность модулей. Применение объектно-ориентированного подхода и шаблонов проектирования стало общепризнанной практикой в современной разработке ПО. В рамках работы предложена архитектура, в которой новые обработчики можно добавлять без изменения существующего кода, что значительно повысит надёжность и масштабируемость системы [1].

Предлагаемое решение включает следующие ключевые элементы:

Выделение классов маршрутизатора и фабрики. Создается отдельный компонент маршрутизации запросов (класс «Router») и отдельная структура-фабрика, описывающая объекты-обработчики (класс «Factory»). Каждый из объектов соответствует своему типу запросов, работа с ними может осуществляться параллельно, а программный код становится менее связным: изменения в одном компоненте меньше влияют на остальные [2].

Предложено использование перечислений и структур для описания маршрутов. Пути запросов формализованы с помощью типов-перечислений и структур (Router::Match), которые определяют шаблоны URL и параметры. Такой подход упрощает логику сравнения маршрутов и позволяет быстро сопоставлять входящие запросы с соответствующими обработчиками без проверки громоздких условий. Дополнительно используется хэш-таблица, в которой ключом выступает URL или его нормализованное представление, а значением — соответствующий обработчик, что обеспечивает доступ к обработчику за константное время O(1).

Расширяемость системы. Новые типы запросов и соответствующие им обработчики добавляются созданием новых классов без изменения существующего кода. Использование хэш-таблицы при этом не требует изменения существующих механизмов поиска, так как добавление нового обработчика сводится к добавлению новой записи в таблицу. Благодаря этому появляются возможности безболезненно расширять функциональность, не затрагивая проверенный код [1].

Поддержка иерархии запросов и объектов. Построены иерархия запросов и объектов-обработчиков, что позволяет естественным образом выражать вложенную бизнес-логику.

Общий базовый класс для групп схожих запросов может быть расширен специализированными подклассами с переопределением поведения [1].

Параллельное выполнение обработчиков. При наличии соответствующей серверной платформы (многопоточной или распределённой) система может обрабатывать несколько запросов одновременно. Дополнительный вклад в повышение производительности вносит применение хэш-таблиц, позволяющих сократить время поиска обработчика с линейного до константного, что особенно критично при большом количестве маршрутов. Таким образом при росте нагрузки время отклика уменьшается за счёт более полного использования ресурсов (похожий эффект наблюдается и в СУБД при параллельной обработке запросов) [4].

С использованием предложенного подхода достигнуты следующие результаты:

Сокращено время отклика сервера на HTTP-запросы за счёт более эффективной маршрутизации, использования хэш-таблиц для поиска обработчиков за время O(1) и возможности параллельной обработки.

Существенно увеличена читаемость и надёжность кода: ответственность компонентов чётко разделена между классом маршрутизатора, фабрикой и отдельными классами-обработчиками.

Обеспечена масштабируемость архитектуры: новые типы запросов и объекты-обработчики внедряются без изменений в уже существующие модули, что упрощает расширение функциональности системы.

Поддержка иерархических отношений между обработчиками позволила естественно отразить предметную логику приложения в структуре классов.

Применение объектно-ориентированного подхода и шаблона «Фабрика» позволило формализовать архитектуру обработки HTTP-запросов, сделать её более модульной и устойчивой к росту числа типов запросов и объектов. Разделение функций маршрутизации и создания обработчиков обеспечило слабую связность системы, благодаря чему новые функции внедряются минимально затрагивая ранее написанный программный код. Предложенный в работе подход существенно улучшает технические характеристики серверного приложения: его производительность, надёжность и масштабируемость [5]. Полученные результаты подтверждают, что использование объектной модели при проектировании серверных систем позволяет получить гибкую архитектуру, готовую к расширению и оптимизации при увеличении нагрузки и количества сервисов.

Список литературы:

1. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж Паттерны объектно-ориентированного проектирования. // СПб.: Питер, 2021. // ISBN 978-5-4461-1595-2. // С.264-270
2. Пикус Ф.Г. Идиомы и паттерны проектирования в современном C++. // пер. с анг. А.А.Слинкина. // Москва, 2020. // ISBN 978-5-97060-786-2. // С. 265-270.
3. Подольный В.П. Архитектура высоконагруженных систем. // Системы сбора информации Распределенные системы управления Системы реального времени. // Второе издание. // Москва, 2024. // ISBN 978-5-00227-164-1. // С. 150-160
4. Уильямс Э. Параллельное программирование на C++ в действии. Практика разработки многопоточных программ. // пер. с анг. А.А. Слинкина. // Москва, 2012. // ISBN 978-5-94074-448-1. // С. 338-344.
5. Фаулер М. Рефакторинг: улучшение существующего кода. // пер. с анг. СПб: Символ-Плюс. // СПб.: Питер, 2003. // ISBN 5-93286-045-6. // С. 263.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА РИСКОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА «ОХРАНА ТРУДА»

Посацкова А.С., Романова М.Д.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Согласно ст. 209 Трудового Кодекса РФ: система управления охраной труда [1] (СУОТ) это – комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, которые устанавливают политику и цели в области охраны труда у конкретного работодателя и процедуры по достижению этих целей. В любой системе управления, прежде всего, есть орган, который осуществляет управление, а также объект, которым управляют. Органом управления в СУОТ на предприятии в целом является руководитель, а в цехах, службах и на производственных участках – руководители соответствующих служб и структурных подразделений. Организационно-методическую работу по управлению охраной труда,

подготовку управленческих решений и контроль над их своевременной реализацией осуществляет служба охраны труда предприятия, которая непосредственно подчиняется руководителю. Орган управления анализирует информацию о состоянии охраны труда в структурных подразделениях предприятия и принимает решения, направленные на подведение фактических показателей охраны труда к нормативным. Объектом управления в СУОТ является деятельность служб и структурных подразделений предприятия по обеспечению безопасных и здоровых условий труда на рабочих местах, цехах, производственных участках и предприятии в целом. Управление постоянно осуществляется для достижения определенной цели. Целью управления охраной труда является обеспечение безопасности, сохранения здоровья и работоспособности человека в трудовом процессе. Для обеспечения приемлемого уровня безопасности на производстве необходимо постоянно его контролировать и планировать повышение этого уровня. Для этого необходимо, не дожидаясь аварий, несчастных случаев, инцидентов, выявить существующие опасности, оценить риски проявления таких опасностей, провести расчет и ранжирование рисков, и, наконец, разработать планы по снижению или устранению рисков. Поэтому важным этапом результативности СУОТ является оценка и управление рисками.

АИС «Охрана труда»

На сегодняшний день с учетом сложившейся нормативно-правовой базы в российской практике оценки профессиональных рисков основной проблемой является отсутствие единой методики. В связи с этим на предприятиях профессиональный риск оценивается исходя из существующих методик оценки, таких как:

Матричный метод;

Система Элмери;

Метод Файна-Кинни;

Дерево причин.

Наиболее востребованными являются оценочная система Элмери [2] и метод Файна-Кинни [3].

Элмери - это простая и надежная система оценки уровня безопасности предприятия и рабочего места. Она хорошо подходит для большинства предприятий в промышленности. Эту систему могут использовать также профессиональные училища. Элмери отслеживает важнейшие факторы, влияющие на безопасность рабочего места, которые сгруппированы в семь групп:

производственный процесс;

порядок и чистота;

безопасность труда при работе с машинным оборудованием;

факторы окружающей среды;

эргономика;

проходы и проезды;

возможности для спасения и оказания первой помощи.

Для проведения наблюдений разработаны анкета и инструкция. Оценка производится на выбранном рабочем месте, и результаты заносятся в анкету по принципу *хорошо, плохо, отсутствует*. Пункт признается хорошим, если он отвечает минимальному уровню требований законодательства, а также дополнительным основаниям для одобрения, данным в системе Элмери, выработанным на основании требований законодательства об охране труда и положительного опыта на предприятиях. Графа *отсутствует,* используется в случае, если по какой-либо причине вы не можете оценить данный вопрос. В эту же графу заносятся данные, если методом наблюдения нельзя определить состояние *хорошо/плохо.* В этом случае необходимо провести специализированный анализ, например, сделать замеры по нормам гигиены труда.

Метод Файна-Кинни является одним из самых популярных методов оценки рисков на рабочем месте. Для его использования на рабочем месте следует выполнить несколько шагов, включая идентификацию опасностей, оценку вероятности возникновения опасности, оценку потенциального вреда, который может быть причинен опасностью, оценку тяжести последствий и определение уровня риска с помощью специальных таблиц Файна-Кинни.

АИС **«Охрана труда»** предоставляет специалисту удобный интерфейс для проведения оценочных расчетов соответствующими методами. ПО разработано в среде программирования Lazarus с поддержкой базы данных SQLite.

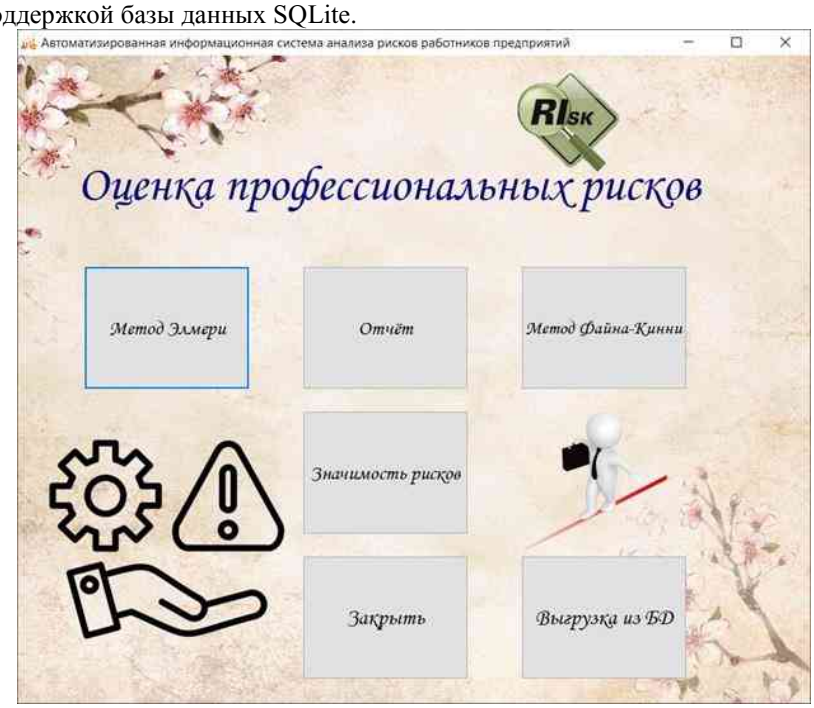
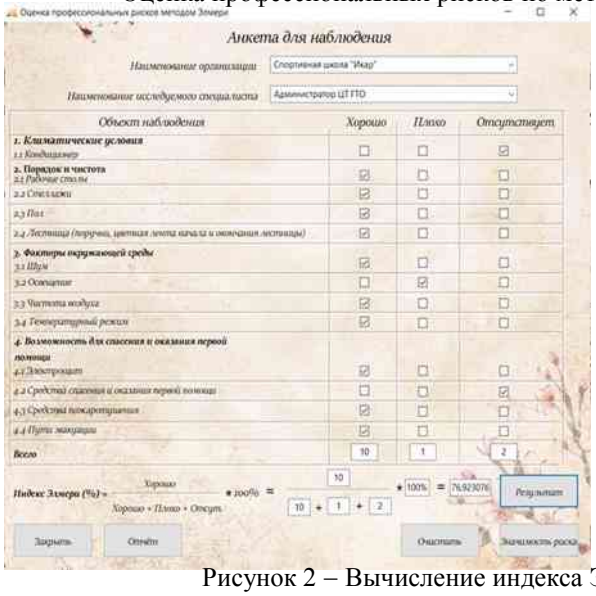


Рисунок 1 – Главная форма приложения

Оценка профессиональных рисков по методу Элмери имеет формат анкеты.



Значимость риска и приоритетность мероприятий по его снижению		
Оценка риска, баллы (R)	Значимость риска	Приоритет мероприятий по снижению риска
0-70	Низкий риск	Специальных мер не требуется. Следует контролировать уровень опасности
71-250	Средний риск	Необходимо запланировать и выполнить мероприятия по снижению риска
251-400	Высокий риск	Необходимо принятие экстренных мер по снижению риска
Более 400	Сверхвысокий риск	Необходимо прекратить деятельность до устранения опасности или снижения риска

Рисунок 2 – Вычисление индекса Элмери и значимости риска

Метод оценки профессиональных рисков Файна-Кинни, оформлен в виде таблицы:

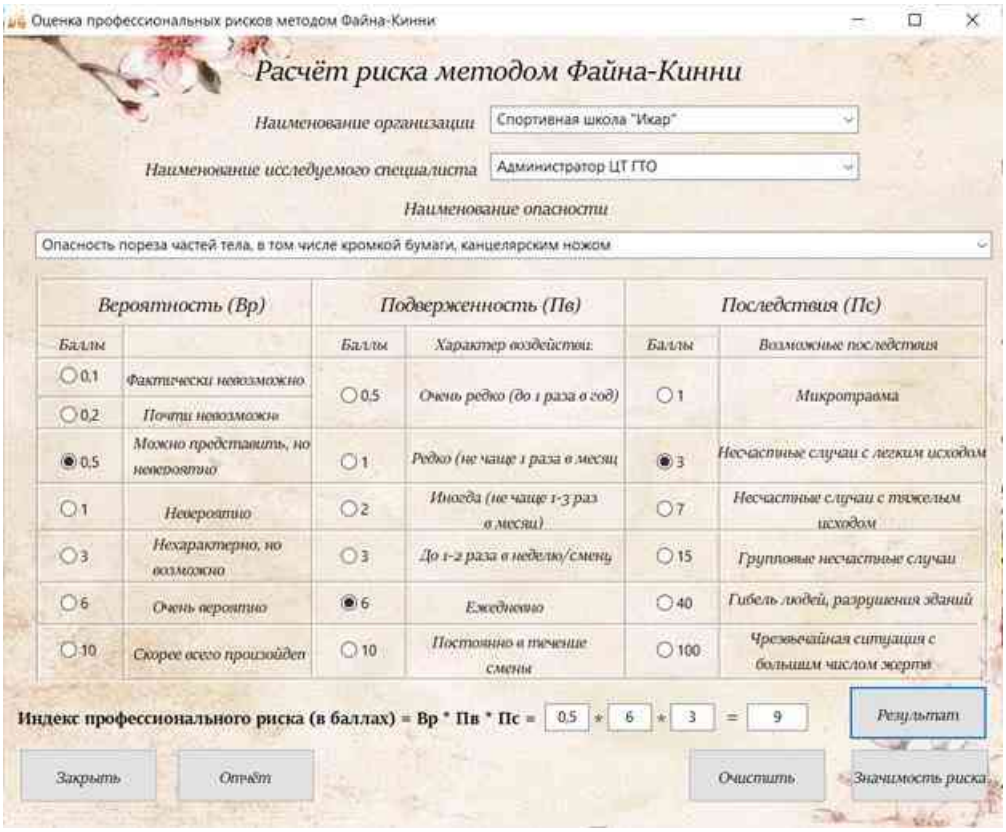


Рисунок 3 – Форма оценки рисков методом Файна-Кинни



Рисунок 4 – Значимость риска по Файна-Кинни

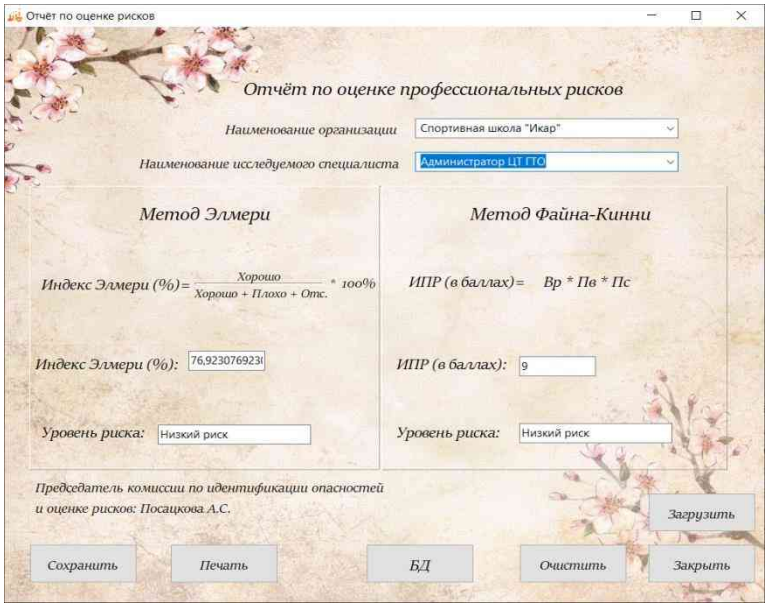


Рисунок 5 – Формирование итогового отчета

Заключение

ПО системы оценки рисков разработано с учетом специфики «Спортивной школы «Икар». В процессе тестирования проанализированы возможные риски и устранены выявленные недочеты. Ключевым достоинством информационной системы является ее кроссплатформенная архитектура, что особенно актуально в условиях меняющихся требований к инструментам и средам разработки. АИС «Охрана труда» готова к расширению функциональных возможностей и адаптации к потребностям какого-либо другого заинтересованного предприятия. Работа выполнена на базе учебно-исследовательской лаборатории СарФТИ НИЯУ МИФИ.

Список литературы:

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 29.09.2025). Раздел X. Охрана труда. Глава 33. Общие положения. Статья 209. Основные понятия – URL: https://sudact.ru/law/tk-rf/chast-iii/razdel-x/glava-33/statia-209 (дата обращения: 20.11.2025). – Текст: электронный.
2. Х. Лайтинен, Т. Ланкинен. Пособие по наблюдению за условиями труда на рабочем месте в промышленности. Система Элмери, 2000. – 21 с.
3. С.В. Бойко. Оценка профессионального риска методом Файна-Кинни, 2015. – 59 с.

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЦИФРОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ В ИНОЯЗЫЧНОМ ОБРАЗОВАНИИ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ

Вихарева Ю.В., Барченкова С.А., Стародубцева Е.А.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Подготовка будущих инженеров к профессиональной коммуникации на английском языке выступает императивным требованием к современному техническому образованию. Однако традиционная методика сталкивается с устойчивыми противоречиями: дефицитом аудиторного времени, гетерогенностью исходного уровня обучающихся, недостаточной интеграцией профессионального контекста [4; 8]. Интеграция технологий искусственного интеллекта и цифровых платформ открывает возможности для персонализации обучения, интенсификации обратной связи и формирования учебной автономии [8; 10]. Цель настоящей статьи – систематизация современных направлений применения ИИ в иноязычной подготовке инженеров и анализ эмпирических данных об эффективности их интеграции.

Методология

Применялись методы компаративного анализа научно-педагогической литературы и обобщения эмпирических данных, полученных в ходе педагогических экспериментов на базе российских и зарубежных университетов (2024–2026 гг.). Эмпирическую базу составили: исследование Цыгановой с соавторами (апробация ИИ-инструментов в техническом вузе, n=120) [8]; исследование Фроловой с соавторами (технология эдьютейнмент с элементами GigaChat) [4]; пилотное исследование SpeakEase для электротехников (n=68) [1]; эксперимент в Политехническом университете Мадрида (n=300) [5].

Результаты и обсуждение

Персонализированное обучение на основе адаптивных платформ. Интеграция ИИ-инструментов обеспечивает персонализацию образовательных траекторий. Платформы (CENTURY Tech, SpeakEase, Dexway AI) адаптируют контент под индивидуальный уровень, темп и профессиональный профиль [1; 3; 7]. Исследование Цыгановой показало повышение мотивации, улучшение усвоения специализированной лексики и развитие уверенности в использовании английского языка в профессиональной деятельности [8].

Диалоговые системы и чат-боты. Наиболее эмпирически верифицированное направление. Чат-боты (Llama3, ChatGPT, GigaChat) создают аутентичные коммуникативные сценарии, обеспечивая безопасную среду для языковой практики без страха ошибки [2; 10]. Приложение SpeakEase с ИИ-чатботом продемонстрировало высокую оценку студентами релевантности контента и удобства использования, способствуя автономному обучению [1].

Автоматизированная оценка и обратная связь. Системы автоматической оценки (Grammarly, QuillBot, Dexway AI) обеспечивают мгновенную персонализированную обратную связь по письменным и устным заданиям [5; 7]. Эксперимент в Мадридском политехническом университете (180 студентов экспериментальной группы, 120 – контрольной) зафиксировал статистически значимое превосходство: аудирование – 98,79% против 90,22%, концептуальное понимание – 95,82% против 84,23% [5].

Эдьютейнмент и иммерсивные технологии. Технология эдьютейнмент сэлементами ИИ (GigaChat) в сочетании с интерактивными формами (научная конференция, дискуссия) интенсифицирует овладение знаниями и повышает вовлеченность магистрантов технического вуза [4]. Виртуальные симуляции и ИИ-ассистированное создание контента (Suno AI для генерации песен) развивают креативность и коммуникативные навыки [9].

Формирование лексической компетенции. Цифровые платформы (Quizlet, Anki, Memrise) с алгоритмами интервальных повторений и корпусные технологии обеспечивают системное усвоение технической терминологии. Интеграция ИИ позволяет персонализировать отбор лексики на основе анализа профессионального контекста [4].

Заключение

Интеграция ИИ-технологий в иноязычное образование будущих инженеров реализуется по четырем направлениям: персонализированное обучение на адаптивных платформах; диалоговые системы и чат-боты; автоматизированная оценка речи и письма; эдьютейнмент и иммерсивные среды.

Эмпирически верифицирована эффективность: повышение мотивации, улучшение усвоения профессиональной лексики, развитие навыков аудирования и говорения, формирование автономии, рост концептуального понимания (95,82% против 84,23%).

Ключевое условие результативности – системная методическая интеграция ИИ-инструментов в целостную образовательную модель, реализуемую на принципах профессионально-ориентированного контекстного обучения.

Перспективы связаны с разработкой дифференцированных моделей для различных инженерных специальностей, изучением потенциала генеративных моделей, лонгитюдными исследованиями устойчивости компетенций.

Список литературы:

1. Yuliantini N.N., Sukerti G.N.A., Dewi D.A.I.C., Laksana I.P.Y. Exploring SpeakEase: A Pilot Study on Mobile ESP Learning for Electrical Engineering // Proceedings of ICOSTAS-SAS 2025. Atlantis Press, 2025. P. 578–586.
2. Bhowmik S., Lotankar S., Dixit M., Munshi A. Bridging Classic and Modern English: An NLP Approach to Translation and Educational Chatbots // 2025 IEEE IATMSI. IEEE, 2025. P. 1–6.

3. CENTURY Tech at Access To Education // Bracknell Forest Council. 2025.
4. Султанова Г. Современные технологии преподавания лексики при обучении английскому языку студентам технических направлений // Лингвоспектр. 2025. № 2.
5. AI-Enhanced PBL and Experiential Learning for Communication and Career Readiness: An Engineering Pilot Course // Algorithms. MDPI, 2025.
6. AI-Powered Copilot for Personalized English Core Skills Learning // Université Euro Méditerranéenne de Fès. 2025.
7. Dexway AI: New e-learning courses with artificial intelligence // Dexway. 2025.
8. Цыганова Л.В., Смирнова Е.В., Плахова О.А. Образовательные возможности искусственного интеллекта в обучении английскому языку студентов технических профилей // Концепт. 2025. № 4. С. 338–353.
9. JAEM: Igniting English, STEM and TVET Excellence at SMK Gedong // UTM NewsHub. 2026.
10. Shanmugasundaram P. Integrating AI Tools in Language Learning for Engineering Students // LinkedIn. 2025.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНОЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Разуваева А.Р., Сироткина А.Г.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Моделирование процесса деформирования твердого тела играет важную роль при решении задач физики. Движение деформируемых твердых тел изучает механика сплошных сред [1], важнейшим разделом которой является теория упругости [2], [3].

Теория упругости является основой машиностроения и строительства и применяется как в решении задач статической прочности и вибропрочности, так и в решении динамических задач. Примером таких задач может служить моделирование крэш-тестов, пробитие различных преград, взрывных воздействий на различные конструкции, и т.д.

Наиболее общепринятым для задач определения напряженно-деформированного состояния является метод конечных элементов (МКЭ) [4], реализованный, в частности, и в модуле «Логос Прочность» пакета программ «Логос» (ПП «Логос»). Однако работы по реализации и использованию метода спектральных элементов (МСЭ) [5], который относится к высокоточным методам, обращают на себя все большое внимание.

Цель и задачи

Цель данной работы заключается в исследовании применимости методов МКЭ и МСЭ на примере одномерной упругопластической задачи. Для этого были поставлены следующие задачи:

Изучить необходимую литературу по МКЭ и МСЭ.

Разработать и программно реализовать МКЭ и МСЭ для решения одномерных упругопластических задач.

Посчитать тестовую задачу о распространении одномерной упругопластической волны.

На основе полученных результатов сравнить эффективность методов.

Теоретическая часть

Задача о распространении одномерной упругопластической волны относится к динамическому типу анализа. Моделирование проводится с использованием модуля динамической прочности ПП «Логос» и применяются следующие методы и алгоритмы:

Явная конечно-разностная схема «крест» при аппроксимации по времени;

Метод конечных элементов;

Метод спектральных элементов;

Модель упругопластического деформирования для описания поведения среды.

Метод конечных элементов

МКЭ подразумевает разбиение области, в которой необходимо найти решение дифференциального уравнения, на конечное число подобластей (элементов), в каждой из которых выбирается вид аппроксимирующей функции. Затем производится суммирование по

всем элементам и полученное решение является искомым. Ниже представлен алгоритм решения одномерной задачи газодинамики методом конечных элементов:

Вычислим матрицу масс M. Для этого в каждой ячейке вычисляем ее вклад в свои узлы. Для левого (правого) узла ячейки он будет равен:

$$\int_{-1}^{1} \rho \cdot \Phi_1(\xi) \cdot \det(J) d\xi \left(\int_{-1}^{1} \rho \cdot \Phi_2(\xi) \cdot \det(J) d\xi \right)$$

После прохождения по всем ячейкам получим в каждом из узлов рассматриваемой области суммарный вклад масс прилегающих элементов.

Вычислим силы в узлах. Для этого, кроме давления, необходимо учитывать объемную вязкость q. В каждом элементе вычислим силы, действующие с этого элемента на узлы. В итоге получим действие на левый (правый) узел в ячейке, равное:

$$-\frac{1}{2} \cdot \int_{-1}^{1} (p+q) d\xi \left(\frac{1}{2} \cdot \int_{-1}^{1} (p+q) d\xi \right)$$

После суммирования вычисленных сил в каждом узле в результате получим искомые узловые силы.

Вычислим ускорение по формуле: $a_i^n = f_i^n / M_i^n$

Вычислим скорости по формуле: $v_i^{n+1/2} = v_i^{n+1/2-\gamma} + \gamma \Delta t a_i^n, \quad \gamma = \begin{cases} 0.5, & n = 0 \\ 1, & n > 0 \end{cases}$

Применим граничные условия и рассчитаем смещения узловых координат.

Вычислим энергии и давления: $E^{*n+1} = E^n - \frac{1}{2} \Delta V (p^n + q^{n-\frac{1}{2}} + q^{n+\frac{1}{2}})$

Если уравнение состояния является линейным, тогда: $p^{n+1} = A^{n+1} + B^{n+1} E^{n+1}$

Таким образом, получим:

$$p^{n+1} = \frac{A^{n+1} + B^{n+1} E^{*n+1}}{1 + \frac{1}{2} B^{n+1} \Delta V} = \frac{p(\rho^{n+1}, E^{*n+1})}{1 + \frac{1}{2} B^{n+1} \Delta V}$$

$$E^{n+1} = E^{*n+1} - \frac{1}{2} \Delta V p^{n+1}$$

Если же уравнение состояния нелинейное, тогда: $p^{*n+1} = p(\rho^{n+1}, E^{*n+1})$

$$E^{n+1} = E^{*n+1} - \frac{1}{2} \Delta V p^{*n+1}$$

$$p^{n+1} = p(\rho^{n+1}, E^{n+1})$$

Возвращаемся на шаг 2.

Метод спектральных элементов

МСЭ использует приближенное решение в той же форме, что и метод конечных элементов. Как и в предыдущем методе, аппроксимирующие и весовые функции отличны от нуля во всей вычислительной области. Основным отличием данного метода является то, что в качестве аппроксимирующих и весовых функций выбираются ортогональные функции, которые являются собственными функциями задачи Штурма – Лиувилля [6].

В качестве базисных функций используются интерполяционные многочлены, представляющие собой комбинации полиномов Лежандра и их производных, получившие название полиномов Гаусса – Лежандра – Лобатто:

$$C_i(x) = \frac{-1}{n(n+1)L_n(x_i)} \frac{(1-x^2)L_n'}{x-x_i}, \quad C_i(x_j) = \delta_{ij}, \quad где \quad \delta_{ij} - символ \quad Кронекера,$$

$$x_j - точки \quad Лежандра - Гаусса - Лобатто, \quad определяемые \quad формулой:$$

$$x_0 = -1, \quad x_j - нули\, L_n', \quad j = 1,2...n-1, \quad x_n = 1$$

Веса, необходимые для численного интегрирования определятся соотношением:

$$w_j = \frac{2}{n(n+1)} \frac{1}{L_n(x_j)^2}, \quad j = 0,1...n$$

Полиномы Лежандра определяются следующими рекуррентными соотношениями:

$$L_0(x) = 1, \quad L_1(x) = x, \quad L_{k+1}(x) = \frac{2k+1}{k+1} xL_k(x) - \frac{k}{k+1} L_{k-1}(x), \quad k = 1,2...n$$

Недостатком МСЭ является то, что многочлены Якоби являются ортогональными на отрезке $[-1,1]$ и, следовательно, утверждения об экспоненциальной скорости сходимости приближенного решения к точному имеют место только в случае, когда область интегрирования представляет собой единичный отрезок. Для того, чтобы решить задачу с произвольной областью интегрирования, необходимо осуществить замену координат, переводящую исходную область интегрирования в единичный отрезок.

Программная реализация

Для того, чтобы внедрить программную реализацию МКЭ и МСЭ в модуль «Логос Прочность», необходимо выполнить следующее:

Обеспечить чтение данных для нового типа элементов с учётом декомпозиции элементов в случае многопроцессорного счета;

Реализовать блок описания функций форм и производных по пространству для функций форм;

Реализовать функцию нахождения тензора скоростей деформации (UpdateStrainVel);

Реализовать функцию нахождения внутренних сил, вырабатываемых элементом от текущих напряжений и давления (CalcInternalForce);

Реализовать функцию обновления давления, напряжений и энергии по вычисленному тензору скоростей деформации (UpdateCellValue) с учётом упругопластического закона деформирования.

Постановка задачи и обработка результатов

Рассмотрим одномерную упругопластическую задачу на примере распространения упругопластической волны на длине 11 см. На границе Г0 задано граничное условие – жесткая стенка. На границе Г1 задано постоянное граничное давление, как показано на рисунке 1.



Рисунок 1 – Начальная геометрия

Для описания упругопластического деформирования применялась упругопластическая модель с постоянным пределом текучести. Использовался абстрактный материал со следующими физико-механическими свойствами:

Модуль сдвига G = 15 ГПа;

Предел текучести $\sigma_т$ = 1 ГПа;

Массовая плотность ρ = 1 г/см^3.

Решение задачи получено на основе явной схемы интегрирования по времени в ПП «Логос». При моделировании задачи применялись одномерные КЭ и СЭ. В качестве

эталонного взято решение аналогичной задачи, полученное в двумерном приближении с помощью МКЭ на достаточно подробной сетке в ПП «Логос». Расчет производился на трех сетках. Число конечных (спектральных) элементов, используемых для аппроксимации, на первой сетке равно 11, на второй – 22 и на третьей – 44.

Заключение

В результате проделанной работы можно сделать вывод о том, что при небольшом количестве узлов МСЭ не имеет особых преимуществ перед МКЭ. Однако, основываясь на изученном, можно предположить, что при решении аналогичной двумерной задачи и при большем количестве узлов МСЭ будет предпочтительнее в силу простоты задания аппроксимирующих функций и более высокой скорости сходимости.

Список литературы:

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.1. – М.: Наука, 1970 – 492с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 7. / Теория упругости – М.: Наука, 1987 – 247с.
3. Ляв А. Математическая теория упругости. – М.: Полигрфкнига, 1935. – 675 с.
4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер // пер. с англ. под ред. Н.В. Баничука – М.: Мир. – 1984. – 428 с.
5. Бубенчиков А.М., Попонин В.С., Фирсов Д.К. Спектральный метод решения плоских краевых задач на неструктурированной сетке// Математическое моделирование. 2007. Т. 19. №10, с. 3 – 14.
6. Левитан Б.М., Саргсян И.С. Операторы Штурма – Лиувилля и Дирака. – М.: Наука, 1988 – 432 с.

ПЕРСОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ СПИСКОВ МУЗЫКАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Чередниченко К.-А.Е., Юферева Т.В.

Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В современном мире сердечно-сосудистые заболевания остаются одной из главных причин смертности. Высокий темп жизни и стресс приводят к артериальной гипертензии – устойчивому повышению давления. В то же время растет интерес к немедикаментозным методам коррекции физиологического состояния. Исследования подтверждают, что музыка способна влиять на вегетативную нервную систему: через изменение частоты сердечных сокращений (ЧСС) опосредованно регулируется и артериальное давление (АД) [1][2]. Однако существующие списки композиций подбираются субъективно, без учета точных физических параметров композиций и их влияния на организм. Поэтому важно создать математический подход, который позволит формировать последовательности композиций, гарантированно приводящие к снижению АД.

Для математического моделирования процесса нормализации давления необходимо установить связь между музыкальным темпом и физиологическими показателями. Ключевым здесь является явление захвата ритма – способность сердца синхронизироваться с внешним ритмическим стимулом [3]. Таким образом, управляя пульсом с помощью музыки, можно косвенно влиять на давление.

Предложим простую математическую модель изменения давления $P(t)$ под воздействием музыкальной терапии. Пусть $H(t)$ — текущая ЧСС, а $H_{целевой}$ — желаемая ЧСС (60–70 уд/мин). Эффективность воздействия отдельной композиции зависит от ее темпа BPM (ударов в минуту). Введем функцию соответствия $H(t, BPM)$, которая показывает, насколько сильно данная композиция способна изменить пульс. Тогда динамика пульса будет описываться уравнением:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -k(BPM - H(t)) \cdot (H(t) - H_{целевой})$$

где $k(BPM - H(t))$ — зависящий от разности пульса и BPM коэффициент индивидуальной чувствительности. Физический смысл: скорость изменения пульса пропорциональна двум факторам – разрыву между темпом музыки и текущим пульсом (стремление к синхронизации) и отклонению от целевого значения (стремление к норме) [4]. Давление $P(t)$ связано с пульсом

через линейное приближение: $P(t) = P_0 + \alpha \cdot (H(t) - H_0)$, где α — эмпирический коэффициент связи пульса и давления [2], H_0, P_0 — пульс и давление до начала прослушивания.

Теперь, описав модель воздействия, можно перевести её в компьютерную программу. Для этого был выбран язык программирования Python с библиотекой Librosa для анализа аудио.

Сначала программа заранее анализирует музыкальную библиотеку пользователя, а именно, измеряет удары в минуту (УВМ), причём не в среднем по композиции, а потактово, чтобы выявить динамику: снижение УВМ (деминуэндо), увеличение УВМ (крещендо), а также резкие смены темпа. Получив от пользователя исходные показатели пульса, программа сортирует композиции, используя систему приоритетов:

максимальная приближённость УВМ начала композиции к показателям пульса, а в дальнейших композициях максимально плавный переход УВМ конца одной композиции с УВМ началом другой.

насколько композиция приближает темп к желаемому результату.

плавность изменения темпа от начала к концу.

максимальная разница УВМ между двумя соседними тактами.

В итоге получается отсортированный список композиций, который уменьшает ЧСС и как следствие, АД.

Таким образом, в работе описано получение математической модели влияния музыкального темпа на сердечно-сосудистую систему, на основе которой была реализована программа для автоматического составления терапевтических списков, направленных на нормализацию артериального давления. Программу можно дорабатывать, усложнив модель, например, добавление учета жанровых предпочтений или данных с тонометра.

Список литературы:

1. Суботялова А.М., Суботялов М.А. Влияние музыки на сердечно-сосудистую систему (2024) [Электронный ресурс]. Доступ: https://sn-biolchem.cfuv.ru/vliyanie-muzyki-na-serdechno-sosudistuyu-sistemu-obzor/

2. Barnett et al. Modeling Arterial Pulse Pressure From Heart Rate During Sympathetic Activation by Progressive Central Hypovalemia (2018) [Электронный ресурс]. Доступ: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5900383/?report=classic

3. Marco Barbaresi, Davide Nardo, Sabrina Fagioli. Physiological Entrainment: A Key Mind–Body Mechanism for Cognitive, Motor and Affective Functioning, and Well-Being (2024) [Электронный ресурс]. Доступ: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11763407/

4. Modeling personalized heart rate response to exercise and environmental factors with wearables data (2023) [Электронный ресурс]. Доступ: https://www.nature.com/articles/s41746-023-00926-4

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ЭТАЛОНОВ В СИСТЕМАХ 3D-ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ

Копейкин А.Э., Сарлейский А.В., Михеева К.Н., Васюкова О.Е.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Биометрические системы идентификации личности по изображению лица повсеместно используются в системах контроля и управления доступом (СКУД). Тем не менее, классические 2D-системы, оперирующие плоским изображением, уязвимы к вариациям освещения, ракурса и подвержены критическим уязвимостям, в частности, атакам подмены личности (spoofing attacks) с использованием статических фотографий, видеозаписей или современных deepfake-технологий [8]. Переход к трёхмерным биометрическим эталонам позволяет повысить надежность распознавания, так как пространственная геометрия лица (глубинный профиль, форма скул и подбородка) обладает высокой уникальностью, инвариантностью к условиям освещения и не поддается подделке плоскими носителями [3].

Проблема практического внедрения 3D-биометрии заключается в гетерогенности методов получения пространственных данных [1,2]. На сегодняшний день не существует единого стандарта формирования 3D-эталона. Целью данной работы является создание программного комплекса, реализующего полный цикл математического моделирования пространственных биометрических эталонов, их безопасного хранения, сопоставления и защиты от атак предъявления биометрических подделок.

Архитектура программного комплекса и хранение данных

Разработанный программный комплекс построен по принципу гибридной архитектуры хранения (External Storage Reference). Реляционный слой (SQLite) хранит структурированные текстовые метаданные и сериализованные N - мерные математические векторы (эмбеддинги) в бинарном формате BLOB (NumPy → BLOB через формат NPY). Файловый слой отвечает за хранение тяжелых неструктурированных файлов: трёхмерных облаков точек (PLY) и кадрированных фотографий (JPEG). Для биометрического поиска (1:N) все эмбеддинги извлекаются из BLOB и сравниваются с входным вектором; для пары (1:1) вычисляется единственная метрика сходства.

Для защиты персональных биометрических данных реализовано многоуровневое шифрование: база данных SQLite защищена алгоритмом AES-256-CBC (через SQLCipher) с деривацией ключа функцией PBKDF2-HMAC-SHA512. Все медиафайлы шифруются перед записью на диск симметричным алгоритмом Fernet, объединяющим AES-128 для конфиденциальности и HMAC-SHA256 для аутентификации. Ключи шифрования хранятся в защищённом хранилище операционной системы (Keychain / Credential Manager) через кроссплатформенную библиотеку keyring.

Математические модели построения 3D-эталонов

Система реализует пять фундаментальных математических конвейеров построения пространственного эталона:

Метод PointNet [1] и метрическое обучение. Использует детектор HOG для локализации лица и предобученную нейросеть ResNet для извлечения 128-мерного эмбеддинга. Нейросеть обучена с функцией потерь triplet loss на основе L_2-расстояния. Параллельно модуль shape predictor выделяет 68 анатомических ориентиров, координаты которых нормализуются:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}, \quad \hat{y}_i = -\frac{y_i - \bar{y}}{s}, \quad \hat{z}_i = 0. \tag{1}$$

При регистрации из видеоряда извлекаются 8 кадров, на каждом вычисляется 128-мерный вектор, результаты усредняются:

$$\bar{\mathbf{e}} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} \mathbf{e}_i, \tag{2}$$

формируя стабильный эталон.

MediaPipe FaceMesh [2] и 3DMM [3]. Используется квантизованная нейросеть, возвращающая 478 нормализованных 3D-ориентиров $\mathbf{P}_i$. Применяется каноникализация по межзрачковому расстоянию – IOD. Вычисляется вектор трансляции $\mathbf{T}$ и масштаб S:

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{P}_{33} + \mathbf{P}_{263}}{2}, \quad S = \| \mathbf{P}_{263} - \mathbf{P}_{33} \|_2. \tag{3}$$

Каноническое облако $\mathbf{P}_i = (\mathbf{P}_i - \mathbf{T}) / S$ делает модель полностью инвариантной к расстоянию до камеры, так как все расстояния выражены в «лицевых единицах» (IOD = 1). Из канонического облака строится 60-мерный дескриптор: 50 попарных евклидовых расстояний и 10 значений z - глубины.

Метод 3DMM расширяет подход многокадровым PCA-анализом: кадры выравниваются жёстким Прокрустовым преобразованием (SVD), реконструируется средняя идентичность через первые 80 главных компонент, и формируется 630-мерный дескриптор (C_{35}^2 = 595 расстояний + 35 z - глубин) с обязательным zero-mean центрированием.

Фотограмметрия (Structure from Motion). Метод восстанавливает плотную 3D-сцену по набору изображений. Детекторы извлекают ключевые точки (SIFT для текстуры кожи в COLMAP [4], HAHOG в OpenSfM), оценивается фундаментальная матрица через RANSAC:

$$(\mathbf{p}'_i)^T \mathbf{F} \mathbf{p}_i = 0, \tag{4}$$

после чего выполняется нелинейная оптимизация (Bundle Adjustment) — минимизация суммарной ошибки репроекции 3D-точек на 2D-кадры методом Левенберга–Марквардта:

$$\min_{\{\mathbf{R}_j,\mathbf{t}_j\},\{\mathbf{X}_i\}} \sum_j \sum_{i \in \mathrm{V}_j} \left\| \mathbf{p}_{ij} - \pi(\mathbf{K}_j, \mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j, \mathbf{X}_i) \right\|^2 . \tag{5}$$

Нейросетевой рендеринг (NeRF и 3DGS). NeRF [5] моделирует сцену как непрерывное радиационное поле $F_\Theta : (\mathbf{x}, \mathbf{d}) \mapsto (\mathbf{c}, \sigma)$, вычисляя цвет пикселя дискретным объемным рендерингом вдоль луча:

$$\hat{C}(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{N} T_k \left(1 - e^{-\sigma_k \delta_k}\right) \mathbf{c}_k, \quad T_k = \exp\left(-\sum_{j=1}^{k-1} \sigma_j \delta_j \right). \tag{6}$$

3D Gaussian Splatting (3DGS) [6] представляет сцену как облако 3D-гауссиан, форма которых задается ковариационной матрицей $\mathbf{\Sigma} = \mathbf{R}\mathbf{S}\mathbf{S}^T\mathbf{R}^T$. Оптимизация минимизирует функцию потерь:

$$\mathrm{L} = (1-\lambda) \cdot \| \hat{\mathbf{I}} - \mathbf{I} \|_1 + \lambda \cdot (1 - \mathrm{SSIM}(\hat{\mathbf{I}}, \mathbf{I})). \tag{7}$$

Для ускорения синтезируется априорная траектория камер (сферическая дуга $\pm 17^\circ$), минуя этап SfM.

LiDAR (Time-of-Flight) [7]. Аппаратный захват карты глубины с последующей билатеральной фильтрацией. Данные с мобильного устройства передаются на компьютер в реальном времени по разработанному бинарному протоколу LDR1 поверх UDP (17-байтный заголовок с сигнатурой, фрагментация кадров с лимитом 1400 байт). Координаты депроецируются в мировую систему с использованием матриц ARKit . Облака склеиваются алгоритмом Iterative Closest Point (ICP), очищаются методами DBSCAN-кластеризации и фильтра кривизны, выравниваются по анатомическим ландмаркам MediaPipe с нормализацией масштаба IOD = 1 и сглаживаются реконструкцией поверхности Пуассона.

Формирование дескрипторов и метрики сопоставления

Для работы с гетерогенными данными разработаны три типа дескрипторов:

128-мерный нейросетевой дескриптор (dlib ResNet): сравнение через евклидово расстояние:

$$d(\mathbf{q}, \mathbf{e}_j) = \| \mathbf{q} - \mathbf{e}_j \|_2 < \tau, \quad \tau = 0.5. \tag{8}$$

Выбор L_2 - метрики обусловлен функцией потерь обучения (triplet loss);

60- и 630-мерные геометрические дескрипторы: формируются из попарных расстояний между анатомическими ориентирами в каноническом IOD-пространстве и значений Z-глубин;

256-мерный статистический дескриптор: применяется для нерегулярных облаков (SfM, NeRF, 3DGS, LiDAR). Включает базовые статистики ($\mu, \sigma, \min, \max$ — 12 dim), радиальные (32 dim) и угловые гистограммы (48 dim), отсортированные минимальные расстояния (128 dim) и осевые проекции плотности (36 dim).

Все векторы проходят строгую L_2 - нормализацию: $\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{e} / (\| \mathbf{e} \|_2 + \varepsilon)$. Сравнение эталонов выполняется на основе косинусного сходства:

$$S_{\cos}(\hat{\mathbf{e}}_A, \hat{\mathbf{e}}_B) = \sum_{i=1}^{N} \hat{e}_{A,i} \cdot \hat{e}_{B,i} \geq \tau, \tag{9}$$

где порог τ устанавливается на уровне 0.8 (для 256-dim) или 0.9 (для 60-dim).

Подсистема антиспуфинга

Реализована трёхуровневая подсистема защиты от биометрических подделок (Liveness Detection):

Анализ кинематики (EAR) [8]: детекция естественного моргания по падению отношения вертикального раскрытия глаза к горизонтальному:

$$\mathrm{EAR} = \frac{\| p_2 - p_6 \| + \| p_3 - p_5 \|}{2 \cdot \| p_1 - p_4 \|}. \tag{10}$$

Моргание фиксируется при EAR < 0.72•$\mathrm{EAR}_{\max}$ с абсолютным перепадом не менее 0.065;

Нейросетевой текстурный анализ: использование модели MiniFASNetV2 для выявления микроартефактов экранов (видео-атаки) с порогом вероятности живого лица $\overline{P} \geq 0.985$;
Протокол Challenge-Response: защита от deepfake-генераций путем случайной выдачи заданий (повороты головы, открытие рта) с криптографической рандомизацией.
Дополнительно, методы LiDAR и SfM обладают аппаратной устойчивостью к 2D-подделкам, так как дисперсия физической глубины σ_z плоского экрана составляет меньше 10^{-3} м, что автоматически отбрасывается алгоритмами фильтрации как невалидная геометрия.

Заключение

В рамках работы разработан программный комплекс, реализующий полный цикл 3D-идентификации личности. Сформированы математические модели пяти алгоритмов реконструкции эталонов. Доказана критическая необходимость каноникализации облаков точек по межокулярному расстоянию для обеспечения инвариантности к расстоянию до камеры и корректности усреднения облаков с нескольких кадров.

Спроектированы математические аппараты формирования высокоразмерных биометрических признаков (60-, 256- и 630-мерных), показана эффективность их L_2-нормализации в связке с метрикой косинусного сходства для распознавания гетерогенных 3D-облаков. Внедренная трёхуровневая система антиспуфинга, бинарный протокол передачи LiDAR-данных LDR1 поверх UDP и криптографическое ядро БД создают надежный технологический фундамент для защиты систем контроля и управления доступом нового поколения.

Список литературы:

1. Qi C. R., Su H., Mo K., Guibas L. J. PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR). – 2017. – С. 652-660.
2. Kartynnik Y., Ablavatski A., Grishchenko I., Grundmann M. Real-time facial surface geometry from monocular video on mobile GPUs // CVPR Workshop on Computer Vision for Augmented and Virtual Reality. – 2019. – С. 1-4.
3. Blanz V., Vetter T. A morphable model for the synthesis of 3D faces // Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH). – 1999. – С. 187-194.
4. Schönberger J. L., Frahm J. M. Structure-from-Motion Revisited // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR). – 2016. – С. 4104-4113.
5. Mildenhall B., Srinivasan P. P., Tancik M. et al. NeRF: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis // Communications of the ACM. – 2021. – Т. 65. – №. 1. – С. 99-106.
6. Kerbl B., Kopanas G., Leimkühler T., Drettakis G. 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering // ACM Transactions on Graphics. – 2023. – Т. 42. – №. 4. – С. 1-14.
7. Luetzenburg G., Kroon A., Bjørk A. A. Evaluation of the Apple iPad Pro LiDAR sensor for 3D mapping // Data. – 2021. – Т. 6. – №. 3. – С. 28.
8. Soukupová T., Čech J. Real-time eye blink detection using facial landmarks // 21st Computer Vision Winter Workshop (CVWW). – 2016. – С. 1-8.

ЭРГОНОМИКА КЛАВИАТУРЫ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ РАСКЛАДКИ

Куприянов Ф.В.[1], Ерёмин И.А.[1], Шкаев Р.Е.[2]

[1]Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

[2]ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

История клавиатурной раскладки QWERTY представляет собой пример того, как случайное или конъюнктурное решение становится мировым стандартом. В 1870-х годах Кристофер Шоулз создал её для пишущих машинок Remington. Согласно наиболее распространённой версии, расположение букв было изменено по сравнению с алфавитным порядком для того, чтобы механические рычаги-молоточки не зацеплялись друг за друга при последовательном нажатии часто встречающихся соседних символов. Альтернативная теория связывает это решение с маркетинговыми соображениями: слово TYPEWRITER можно было напечатать, используя только буквы верхнего ряда, что служило эффектной демонстрацией для

покупателей. Независимо от истинной причины, современные пользователи до сих пор вынуждены использовать техническое решение, принятое в XIX веке [1].

Русская раскладка ЙЦУКЕН представляет собой советскую адаптацию QWERTY. Она унаследовала те же проблемы и те же компромиссы: указательные пальцы выполняют львиную долю работы, мизинцы практически бездействуют, а значительная часть буквосочетаний печатается одним пальцем. Это не только замедляет скорость набора, но и повышает утомляемость, а при длительной работе увеличивает риск развития профессиональных заболеваний кистей.

Современные исследования в области эргономики клавиатурных раскладок выделяют несколько ключевых метрик, позволяющих объективно оценить эффективность расположения символов [2]. К таким метрикам относятся: процент однопальцевых сочетаний, распределение нагрузки между различными пальцами, доля нажатий, приходящаяся на домашний ряд, количество роллов (плавных последовательных движений соседними пальцами), а также баланс нагрузки между левой и правой руками. Оптимальная раскладка должна минимизировать однопальцевые сочетания, равномерно распределять биомеханическую нагрузку и максимизировать использование домашнего ряда, что позволяет снизить количество перемещений кистей.

Авторская раскладка «Весна» была разработана с учётом перечисленных требований. Основная цель при её создании заключалась в том, чтобы сохранить узнаваемость ЙЦУКЕН для облегчения перехода, но при этом устранить ключевые эргономические недостатки традиционной раскладки. Результаты сравнительного анализа оказались существенными.

Нагрузка на указательные пальцы в раскладке «Весна» составляет 21% против 32% в ЙЦУКЕН — снижение более чем на треть. Средние пальцы загружены на 12–14%, безымянные и мизинцы — на 7–8%. Такое распределение обеспечивает сбалансированную работу кисти, при которой ни один палец не подвергается избыточной нагрузке.

Особенно показательным является сравнение по критерию однопальцевых сочетаний. Этот параметр напрямую влияет на скорость печати, поскольку при последовательном нажатии разных клавиш одним пальцем возникают вынужденные паузы. В раскладке ЙЦУКЕН доля однопальцевых сочетаний составляет 18,9%, то есть почти каждая пятая пара букв набирается одним пальцем. В раскладке «Весна» этот показатель снижается до 1,36%, что соответствует улучшению в 14 раз. Движения становятся более плавными, пальцы не «ждут» друг друга.

Доля нажатий на домашнем ряду в раскладке «Весна» достигает 47,7% против 32,5% в ЙЦУКЕН. Почти половина всех нажатий выполняется с базовой позиции, что существенно снижает утомляемость кистей. Доля роллов — плавных последовательных движений соседними пальцами — увеличилась до 46,7% по сравнению с 24,9% в ЙЦУКЕН, что делает процесс печати более естественным и ритмичным.

В последние годы значительную популярность приобретают сплит-клавиатуры — модели с раздельными половинами, позволяющие расположить кисти на ширине плеч. Такая конструкция снижает статическую нагрузку на запястья и способствует профилактике туннельного синдрома. Однако использование сплит-клавиатур требует адаптации раскладок. Опытные пользователи устанавливают на такие клавиатуры свободные прошивки Vial или QMK, которые предоставляют доступ к многослойной организации ввода [3]. Принцип работы заключается в следующем: при зажатии модификатора (например, Alt) под теми же пальцами оказываются другие символы. Такие решения получили название «раскладок вызова» (access layer). Базовый слой используется для обычной печати, а дополнительные слои, активируемые зажатым Alt, — для специальных символов, цифр или переключения языка. Это позволяет разместить сотни символов на компактной клавиатуре без потери эргономики.

В рамках проекта «Анализатор раскладок» (доступен на GitHub: Travushki-Muravushki) разработана программа для комплексного анализа эффективности клавиатурных раскладок [4]. Программа оценивает четыре метрики с различными весовыми коэффициентами: удобство комбинаций (40% веса), штраф на пальцы (30%), равномерность распределения нагрузки между пальцами (20%) и баланс между правой и левой руками (10%). Анализатор автоматически загружает текст, определяет язык, фильтрует раскладки и выдаёт итоговый рейтинг.

Отдельным результатом работы является проект Alt_access_layer — конфигурация для клавиатур с поддержкой прошивки Vial [5]. Файл final.vil может быть прошит в контроллер, после чего пользователь получает доступ ко всем слоям без установки дополнительного программного обеспечения. Раскладка содержит пять слоёв: кириллица (основной слой),

кириллица с зажатым левым Alt, латиница, латиница с зажатым левым Alt и слой специальных символов. Переключение между кириллицей и латиницей осуществляется правой специальной клавишей, а активация слоя спецсимволов — левой.

Таким образом, эргономика клавиатурной раскладки оказывает непосредственное влияние не только на скорость печати, но и на утомляемость оператора, частоту ошибок и долгосрочное здоровье кистей. Раскладка «Весна» демонстрирует, что возможно существенно улучшить эргономические показатели, сохранив узнаваемость и обеспечив плавный переход с традиционной ЙЦУКЕН. Многослойные раскладки представляют собой следующий этап эволюции, позволяющий разместить все необходимые символы под пальцами без увеличения физического размера клавиатуры.

Список литературы:

1. Льюис А. Эргономика клавиатур: от QWERTY к современным решениям. — М.: ДМК Пресс, 2023. — 256 с.
2. Смит Дж. Оптимизация ввода текста: исследование клавиатурных раскладок // Журнал эргономики. — 2024. — №3. — С. 45-62.
3. Johnson M. Split keyboards and layer-based layouts: A modern approach // Ergonomics Today. — 2025. — Vol. 12. — P. 78-95.
4. Куприянов Ф.В. Анализатор раскладок [Электронный ресурс] // GitHub. — 2026. — URL: https://github.com/LiebeII/Travushki-Muravushki.
5. Куприянов Ф.В. Alt_access_layer: многослойная раскладка для Vial [Электронный ресурс] // GitHub. — 2026. — URL: https://github.com/LiebeII/Alt_access_layer.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЯ

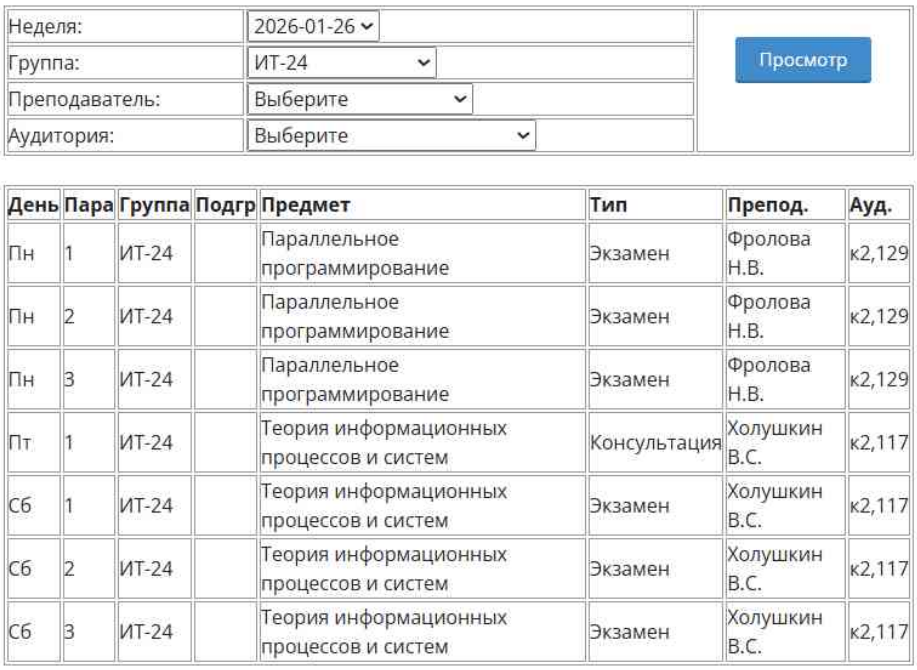
Ерунов Д.Н., Кирпиченко Э.В., Рябков А.В., Соловьев Т.Г.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Каждому студенту вне зависимости от места обучения знакомо изнуряющее чувство, вызываемое «окнами» между парами в расписании. Они значительно затрудняют планирование дня и вынуждают искать себе хоть какое-то занятие на это время. Студенты нашего института не являются исключениями, поэтому тема формирования эффективного расписания меня сразу же привлекла.

Предметная область данного доклада — расписание в вузе — это официальный документ или график, регламентирующий последовательность, время (пары по 90 минут) и место (аудитории) учебных занятий (лекций, семинаров, лабораторий) для групп или преподавателей на семестр. Оно обеспечивает организацию образовательного процесса, составляется деканатом и учитывает учебный план.

Составляя расписание, приходится сталкиваться с множеством ограничений. Например, к «жёстким» относятся: недопустимость наложения расписания (пример – у двух групп разные пары, но в одной аудитории) и соответствие типа помещения (лекционная, компьютерный класс, лаборатория) специфике занятия. К «мягким» можно отнести ограничения, направленные на минимизацию «окон» и обеспечение равномерной учебной нагрузки.

Автоматизация данной предметной области поможет минимизировать влияние человеческого фактора и значительно ускорить пересчет сетки занятий при изменении исходных данных [1]. Использование алгоритмов (жадных, приоритетных или генетических) дает возможность не просто заполнить свободные слоты, а найти наиболее рациональное распределение ресурсов вуза, учитывая интересы всех участников образовательного процесса.



Неделя:	2026-01-26	Просмотр
Группа:	ИТ-24	
Преподаватель:	Выберите	
Аудитория:	Выберите	

День	Пара	Группа	Подгр	Предмет	Тип	Препод.	Ауд.
Пн	1	ИТ-24		Параллельное программирование	Экзамен	Фролова Н.В.	к2,129
Пн	2	ИТ-24		Параллельное программирование	Экзамен	Фролова Н.В.	к2,129
Пн	3	ИТ-24		Параллельное программирование	Экзамен	Фролова Н.В.	к2,129
Пт	1	ИТ-24		Теория информационных процессов и систем	Консультация	Холушкин В.С.	к2,117
Сб	1	ИТ-24		Теория информационных процессов и систем	Экзамен	Холушкин В.С.	к2,117
Сб	2	ИТ-24		Теория информационных процессов и систем	Экзамен	Холушкин В.С.	к2,117
Сб	3	ИТ-24		Теория информационных процессов и систем	Экзамен	Холушкин В.С.	к2,117

Рисунок 1 - Пример системы расписания с сайта sarfti.ru/?page_id=20

Как было отмечено выше, в качестве вариантов для использования в работе рассматривались следующие алгоритмы, представленные в сравнительной таблице 1.

Таблица 1 Сравнение нескольких видов алгоритмов

Метод	**Жадный**	**Приоритетный**	**Генетический**
Принцип работы	Последовательно ставит каждую пару в первый подходящий свободный слот.	Сначала расставляет «сложные» элементы (занятых учителей или дефицитные комнаты).	Создает популяцию случайных расписаний, скрещивает их и проводит мутации для поиска лучшего.
Преимущества	Максимальная скорость работы, простота реализации.	Учитывает специфику вуза, уменьшает количество конфликтов в конце сборки.	Находит оптимальное решение среди миллионов вариантов, гибко подстраивается под критерии.
Недостатки	Низкое качество: много «окон», не учитывает интересы преподавателей.	Требует предварительной сортировки данных.	Сложность разработки, требует больших вычислительных мощностей и времени.

Жадный алгоритм последовательно ставит каждую пару в первый подходящий свободный слот. Это самый быстрый метод, который гарантирует отсутствие конфликтов, но часто создает «окна» и неудобные разрывы в графике, так как не учитывает общую картину.

Приоритетный алгоритм сначала распределяет самые сложные элементы: дефицитные аудитории или занятия преподавателей с плотным графиком. Такая стратегия позволяет избежать тупиковых ситуаций в конце сборки, когда для критически важных пар не остается свободного места.

Генетический алгоритм ищет лучшее решение путем имитации эволюции: он создает сотни вариантов расписания, «скрещивает» их между собой и проводит случайные мутации. Метод требует много времени и ресурсов, но позволяет найти наиболее комфортный график среди миллионов возможных комбинаций.

В итоге было принято разработать и жадный, и приоритетный алгоритмы, сравнивая их результаты и отбирая лучший по критериям в процессе. Такое решение было сделано ввиду относительной простоты к разработке и того, что они более щадящие к ресурсам системы.

Для реализации был выбран язык C++ в кроссплатформенном фреймворке Qt.

В качестве системы хранения данных была выбрана SQLite. Благодаря интеграции через библиотеку QSqlDatabase, удалось реализовать эффективную структуру таблиц с использованием внешних ключей. Визуализация данных построена на архитектуре Model/View с применением QSqlRelationalTableModel и QTableView. Это обеспечило автоматическую подстановку именных данных вместо ID и удобное редактирование через делегатов.

Логика работы с БД вынесена в отдельный класс-менеджер, что позволило изолировать SQL-запросы от интерфейса. Для обеспечения отзывчивости программы процесс генерации расписания вынесен в отдельные потоки через QThread. Обмен данными между потоками реализован на сигналах и слотах. Дополнительно была реализована система экспорта в формат CSV с использованием QFile и QTextStream, а также система логирования событий для отладки алгоритмов.

Логика каждого алгоритма опиралась на проверку доступности трех типов ресурсов: преподавателя, группы и комнаты. Для исключения накладок использовались контейнеры QSet, позволяющие мгновенно определить, занят ли конкретный ресурс в выбранный промежуток времени (слот).

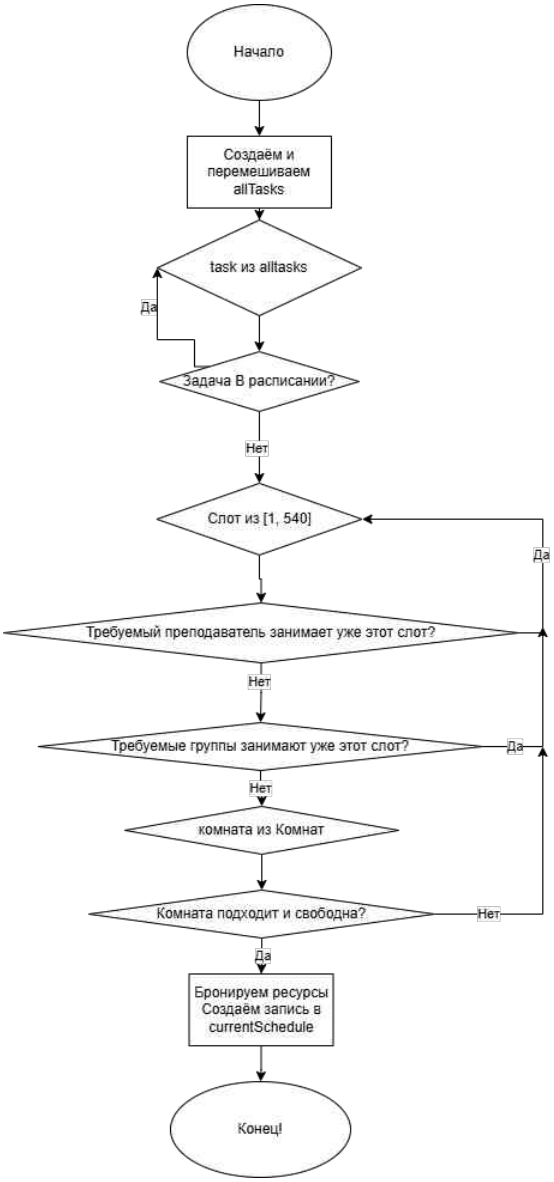


Рисунок 2. Жадный алгоритм

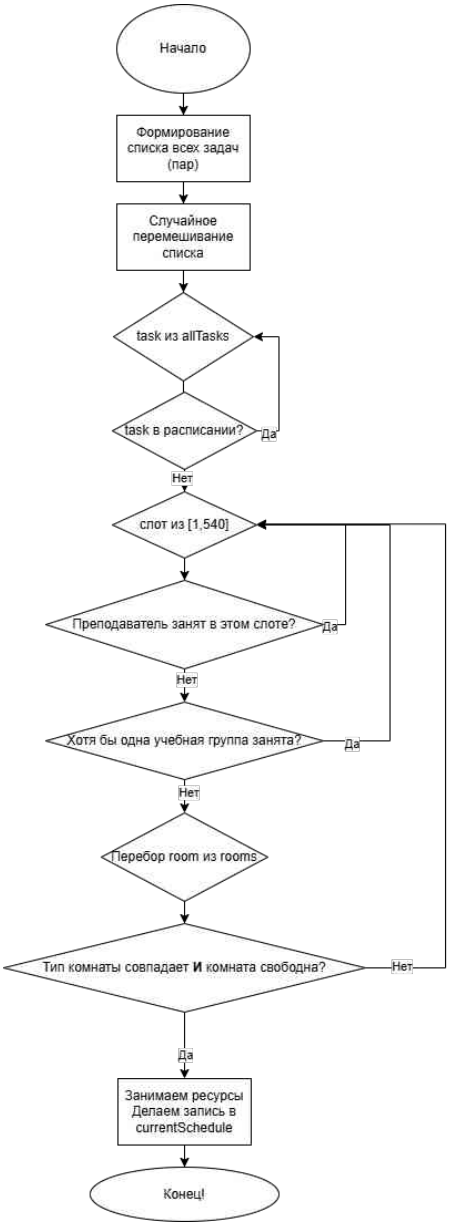
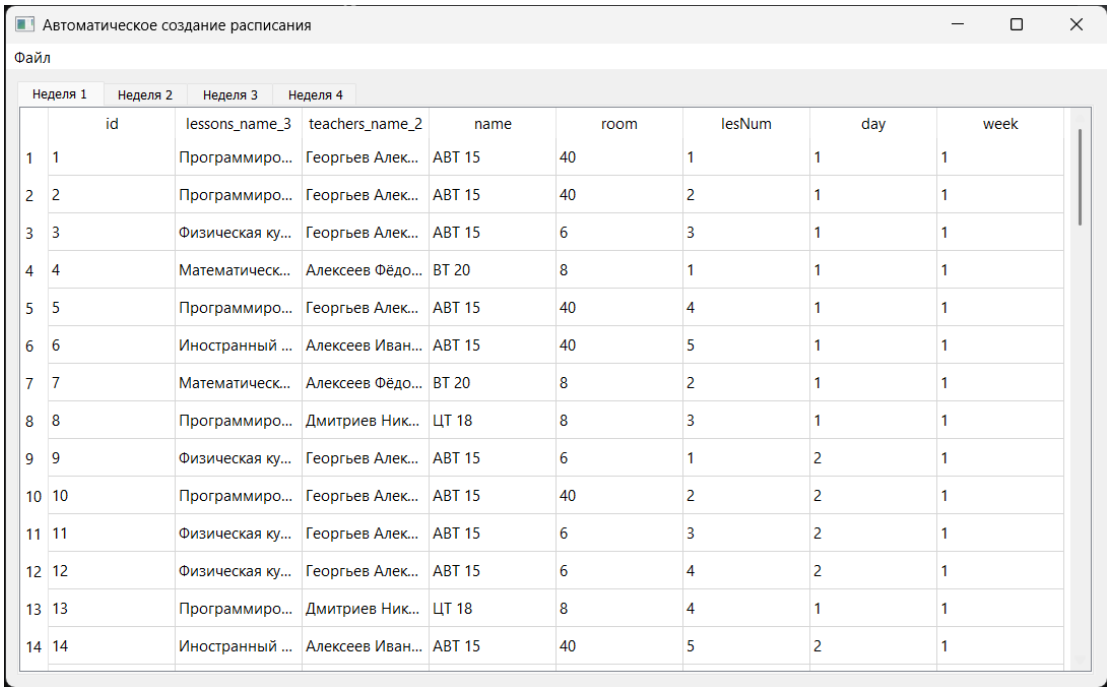


Рисунок 3. Приоритетный алгоритм

Для выбора наиболее качественного варианта из множества сгенерированных решений была внедрена система оценки через «веса». В функции scoreSchedule каждому расписанию начисляются штрафные или бонусные баллы: например, «окна» в середине дня и поздние пары снижают итоговый рейтинг. Программа запускает генерацию сразу в нескольких параллельных потоках по 10 расписаний, после чего сравнивает полученные результаты по накопленным баллам и выводит пользователю тот вариант, который набрал максимальный вес. Такой подход позволил автоматизировать выбор наиболее комфортного графика, минимизируя субъективность и человеческий фактор при оценке итоговой сетки занятий.

На рисунке 4 представлен финальный результат доклада — полноценная информационная система для автоматизации составления учебного расписания. Использование фреймворка Qt и базы данных SQLite позволило создать надежное приложение с интуитивно понятным интерфейсом и высокой скоростью обработки данных. Финальный вариант расписания можно сохранить напрямую в базу данных, либо экспортировать в формате CSV.



	id	lessons_name_3	teachers_name_2	name	room	lesNum	day	week
1	1	Программиро...	Георгьев Алек...	АВТ 15	40	1	1	1
2	2	Программиро...	Георгьев Алек...	АВТ 15	40	2	1	1
3	3	Физическая ку...	Георгьев Алек...	АВТ 15	6	3	1	1
4	4	Математическ...	Алексеев Фёдо...	ВТ 20	8	1	1	1
5	5	Программиро...	Георгьев Алек...	АВТ 15	40	4	1	1
6	6	Иностранный ...	Алексеев Иван...	АВТ 15	40	5	1	1
7	7	Математическ...	Алексеев Фёдо...	ВТ 20	8	2	1	1
8	8	Программиро...	Дмитриев Ник...	ЦТ 18	8	3	1	1
9	9	Физическая ку...	Георгьев Алек...	АВТ 15	6	1	2	1
10	10	Программиро...	Георгьев Алек...	АВТ 15	40	2	2	1
11	11	Физическая ку...	Георгьев Алек...	АВТ 15	6	3	2	1
12	12	Физическая ку...	Георгьев Алек...	АВТ 15	6	4	2	1
13	13	Программиро...	Дмитриев Ник...	ЦТ 18	8	4	1	1
14	14	Иностранный ...	Алексеев Иван...	АВТ 15	40	5	2	1

Рисунок 4 Пример составленного расписания в главном окне

Главным результатом стало внедрение многопоточной генерации с системой оценочных весов. Это позволило программе не просто заполнять свободные ячейки, а выбирать наиболее рациональный и комфортный вариант графика из нескольких альтернатив. Созданный инструмент значительно снижает трудозатраты диспетчера и минимизирует риск возникновения ошибок, обусловленных человеческим фактором, что подтверждает практическую ценность проекта.

Список литературы:

1. Заялов А.М., Новиков А.В. Автоматизация задачи составления учебного расписания // Системный анализ в науке и образовании. 2009 // https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-zadachi-sostavleniya-uchebnogo-raspisaniya

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЕРА С ПОМОЩЬЮ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА В QT

Самойлова П. С., Алексеев В.В.

Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Данная работа посвящена применению муравьиного алгоритма для решения задачи коммивояжера (Traveling Salesman Problem) — классической задачи комбинаторной

оптимизации. В работе раскрываются теоретические основы природных вычислений (Natural Computing) как перспективного подхода к решению сложных оптимизационных задач.

С середины 90-х годов изучаются муравьиные алгоритмы. В его основы заложены принципы природных механизмов, которые описанные с помощью математических моделей, так называемые «Природные вычисления» [1].

В работе проводится сопоставительный анализ подходов к решению задачи коммивояжера. Метод полного перебора гарантирует нахождение точного решения, однако его вычислительная сложность делает его практически неприменимым при росте размерности задачи. Динамическое программирование позволяет сократить перебор за счёт рекуррентного хранения промежуточных состояний, но также ограничено экспоненциальным ростом требуемой памяти. В отличие от точных методов, муравьиный алгоритм относится к классу эвристик и ориентирован на получение приближённого, но практически приемлемого решения за вычислительно реалистичное время.

С помощью муравьиного алгоритма реализуются оптимизационные задачи: комбинаторика, поиск оптимального маршрута при помощи графа. Алгоритм устанавливает, что искусственные «муравьи» ищут оптимальные решения, перемещаясь построенными путями. Он является наиболее эффективным для решения оптимизационной задачи. Муравьи оставляют феромонные следы при возвращении. Тогда часть муравьев будут выбирать эту дорогу, и чем больше этого феромона, тем больше муравьев будут идти по этой дороге. Внутри колонии они взаимодействуют как разумная система.

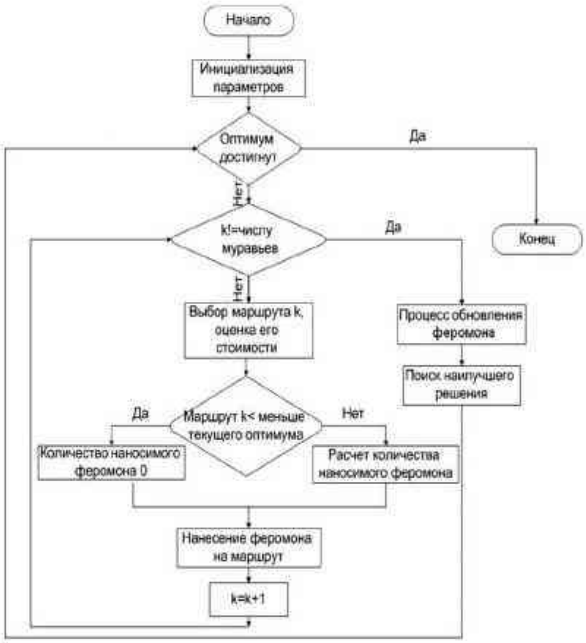


Рис. 3. Блок-схема работы алгоритма

Ключевым механизмом коммуникации в колонии выступает непрямое взаимодействие агентов посредством метаболитов - феромонных маркеров. Интенсивность отложения вещества на ребре коррелирует с успешностью найденного маршрута, что формирует положительную обратную связь [1]. Алгоритм определяется через математическую модель.

В прикладной комбинаторике задача коммивояжера сохраняет статус эталонного теста для новых эвристик. В качестве практически значимого примера выбрана реализация задачи коммивояжера: поиск кратчайшего пути для одной точки, которой необходимо пройти все существующие «города» и вернуться в исходный, с помощью муравьиного алгоритма.

Визуализация и логика алгоритма была реализована в фреймворк QT посредством многопоточности QTimer. Доступ к точкам и феромонам через Qlist.

В рамках данной работы реализована программная модель, в которой колония искусственных муравьев строит допустимые гамильтоновы циклы. На каждом шаге агент принимает решение о переходе в следующую вершину на основе компромисса между длиной ребра и уровнем феромона. По завершении цикла агенты, нашедшие более короткие маршруты, оставляют большее количество феромона, усиливая перспективные направления. Механизм испарения предотвращает преждевременную сходимость к локальным экстремумам и позволяет алгоритму адаптироваться к структуре графа [2].

Список литературы:

1. Телегин В. А. Муравьиные алгоритмы для решения задачи коммивояжера // международный научно-исследовательский журнал. 2024

2. Юрин А. С. Приближенные алгоритмы для задачи коммивояжера: алгоритм муравьиной колонии и 2-opt // «Дневник науки» Электронный научный журнал. 2025. №4.

СРАВНЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ СХЕМЫ HPC И СХЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ KUBERNETES

Поздяев А.Е.
Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Сарове, г. Саров

Классическая схема высокопроизводительных вычислений основана на использовании специализированных вычислительных кластеров, состоящих из вычислительных узлов, управляющего узла, высокоскоростной сети и общей файловой системы.

Задачи в таких системах запускаются через планировщики, например Slurm или PBS. Пользователь заранее задаёт необходимые ресурсы, после чего задача помещается в очередь и выполняется при их освобождении. Такой подход обеспечивает высокую предсказуемость и эффективность использования ресурсов.

Главным преимуществом классической схемы высокопроизводительных вычислений является максимальная производительность за счёт минимальных накладных расходов и прямой работы с оборудованием. Однако такие системы обладают низкой гибкостью и сложны в масштабировании и администрировании.

В противоположность этому, Kubernetes представляет собой систему оркестрации контейнеров, основанную на декларативном управлении. Приложения запускаются в контейнерах, что обеспечивает переносимость и упрощает развертывание.

Kubernetes автоматически управляет размещением, масштабированием и восстановлением приложений, что делает его удобным инструментом для динамических нагрузок.

Однако он изначально не ориентирован на задачи высокопроизводительных вычислений и может вносить дополнительные накладные расходы.

В связи с этим возникает подход объединения высокопроизводительных вычислений и Kubernetes. Он позволяет сочетать высокую производительность классических систем с гибкостью контейнерной оркестрации.

Такое объединение может реализовываться в виде запуска задач высокопроизводительных вычислений в Kubernetes или использования Kubernetes как дополнительного уровня управления. Гибридный подход позволяет более эффективно использовать ресурсы и упрощает интеграцию с современными вычислительными пайплайнами.

При сравнении этих подходов можно отметить, что классическая схема высокопроизводительных вычислений выигрывает в производительности, тогда как Kubernetes обеспечивает гибкость, масштабируемость и удобство разработки.

Тем не менее, использование Kubernetes в высокопроизводительных вычислениях связано с рядом ограничений, включая накладные расходы, сетевые задержки и сложность настройки.

Несмотря на это, гибридные решения уже активно применяются, особенно в задачах машинного обучения и облачных вычислений.

В качестве практического примера была взята операционная система Aramid, разработанную в РФЯЦ-ВНИИЭФ, на которой развёртывается гибридная схема.

Данная система используется в высокопроизводительных вычислительных кластерах и ориентирована на эффективное выполнение ресурсоёмких задач. По своей архитектуре она соответствует классической модели высокопроизводительных вычислений: вычисления выполняются на выделенных узлах, управление осуществляется через планировщики задач, а ресурсы распределяются заранее.

Такой подход обеспечивает высокую производительность и надёжность, однако на практике возникают ограничения.

Во-первых, это сложность работы с программным окружением. Для каждой задачи может требоваться своя версия библиотек и зависимостей, а их настройка в рамках классической системы часто выполняется вручную и требует значительных усилий.

Во-вторых, возникает проблема воспроизводимости. Повторный запуск задачи в идентичной среде может быть затруднён, особенно если система изменялась или использовались разные конфигурации.

В-третьих, ограничена гибкость при работе с различными типами нагрузок, например при комбинировании вычислительных задач и сервисных компонентов, что становится особенно актуальным в задачах машинного обучения.

Использование Kubernetes в дополнение к такой системе позволяет решить ряд этих проблем.

Контейнеризация даёт возможность упаковать приложение вместе со всеми зависимостями, что обеспечивает единообразие среды выполнения независимо от конкретного узла кластера.

Кроме того, Kubernetes упрощает развертывание и управление задачами, позволяя использовать декларативные конфигурации и автоматическое масштабирование.

Это особенно важно в сценариях, где требуется быстрое развертывание вычислительных пайплайнов или интеграция с внешними сервисами.

Таким образом, применение Kubernetes в сочетании с системой Aramid позволяет сохранить преимущества классического подхода высокопроизводительных вычислений — высокую производительность и оптимизацию под оборудование — и одновременно добавить гибкость, переносимость и удобство управления.

РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПЕРЕНОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА «КАБАРЕ»

Ерошкина М.С., Дерюгин Ю.Н.

Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Сарове, г. Саров

Расчет несжимаемых вязких теплопроводных течений представляет собой актуальное направление в современной теплоэнергетике, строительной технике, химической промышленности, металлургии, охране окружающей среды, гео- и астрофизике [1]. Особый интерес представляет проблема повышения точности решения без существенного снижения устойчивости при моделировании теплопереноса. В настоящей работе для численного решения двумерных задач теплообмена предложена явно-неявная методика, основанная на балансно-характеристической схеме «КАБАРЕ» второго порядка точности [2].

Сформулированная в естественных переменных двумерная система уравнений Навье-Стокса (1) – (4), описывающая тепловую конвекцию и включающая уравнения сохранения массы, импульса и энергии, использовала приближение Обербека-Буссинеска для описания сил плавучести [3]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x}+\frac{\partial \rho y^{\nu} v}{y^{\nu}\partial y}=0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t}+\frac{\partial \rho u^2+p}{\partial x}+\frac{\partial y^{\nu}\rho uv}{y^{\nu}\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{y^{\nu}\partial y}\left(y^{\nu}\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\rho\beta g_x\left(T-T_0\right); \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t}+\frac{\partial \rho uv}{\partial x}+\frac{\partial y^{\nu}\rho v^2}{y^{\nu}\partial y}+\frac{\partial p}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{y^{\nu}\partial y}\left(y^{\nu}\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\beta\rho g_y\left(T-T_0\right); \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t}+\frac{\partial \rho uT}{\partial x}+\frac{\partial y^{\nu}\rho vT}{y^{\nu}\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\chi}{C_P}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{1}{y^{\nu}}\frac{\partial}{\partial y}\left(y^{\nu}\frac{\chi}{C_P}\frac{\partial T}{\partial y}\right). \tag{4}$$

Замыкание системы обеспечивается уравнением состояния (5), связывающим давление и плотность в рамках подхода искусственной сжимаемости [4]:

$$p=a^2\left(\rho-\rho_0\right)+p_0. \tag{5}$$

Суть данного подхода заключается в том, что в уравнение неразрывности вводится дополнительный нестационарный член с искусственной сжимаемостью, что позволяет строить решение без дополнительной итерационной процедуры согласования полей скорости и давления на каждом шаге по времени:

$$\frac{1}{a^2}\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial \rho u}{\partial x}+\frac{\partial y^{\nu}\rho v}{y^{\nu}\partial y}=0. \tag{1*}$$

Предложенная математическая модель применима как для плоских, так и для осесимметричных задач.

Для дискретизации системы уравнений (1) – (4) применялась модифицированная разностная схема «КАБАРЕ» со вторым порядком аппроксимации по времени и по пространству. На Фазах I и III нахождение консервативных переменных на промежуточном и новом временных слоях сводится к решению явно-неявной разностной системы уравнений. Уравнение относительно давления является явным и позволяет определить новые значения давления и плотности из замыкающего уравнения состояния (5). Неявные уравнения относительно компонент скорости и температуры решаются методом скалярной прогонки по x-направлению на Фазе I и y-направлению на Фазе III [5]. Фаза II реализуется без изменений по классической методике «КАБАРЕ».

Для верификации предложенного алгоритма рассмотрен ряд тестовых задач: о постоянном поле течения, об установлении поля течения, о теплопроводности, о течении Куэтта и о формировании профиля Пуазейля. Задачи решались как в плоской, так и в цилиндрической постановках.

В результате получены распределения скорости и температуры, а также построены графики сеточной сходимости и сходимости численного решения к аналитическому. На рисунках ниже представлены некоторые результаты численного моделирования для осесимметричных случаев: теплопроводность в кольцевом канале (рис. 1), течения Куэтта (рис. 2) и Пуазейля (рис. 3).

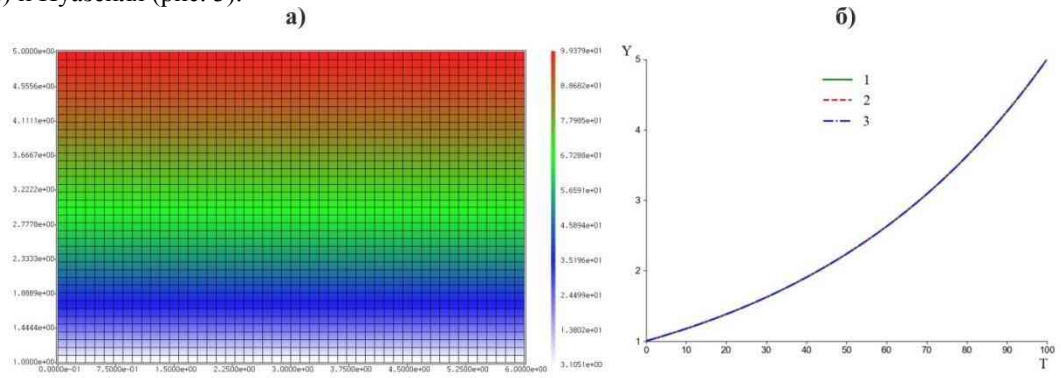


Рисунок 1 – Осесимметричная задача теплопроводности: а) Поле температуры на сетке 51×41; б) График сходимости численного решения к аналитическому: 1 – аналитическое решение: $T(y)=\frac{T_h}{\ln(R)}\ln(y)$, 2 – численное решение на сетке 51×41, 3 – численное решение на сетке 101×81

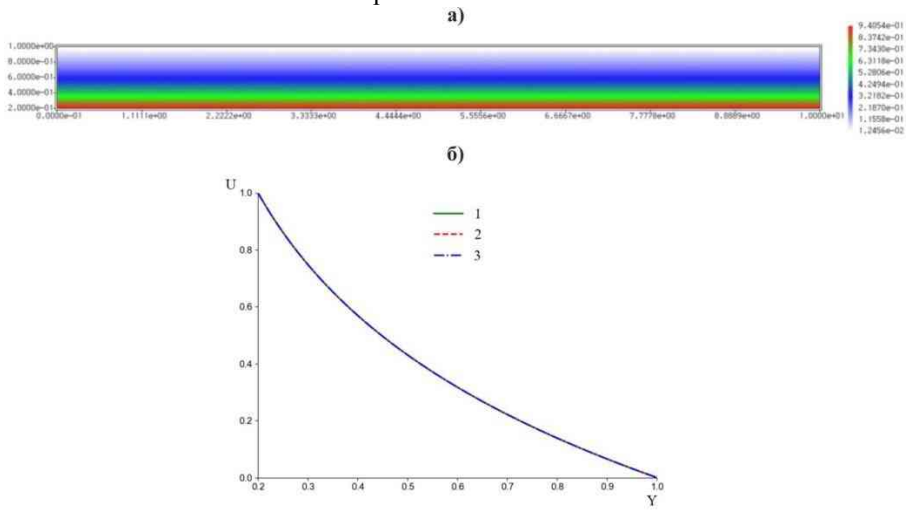


Рисунок 2 – Осесимметричная задача о течении Куэтта: а) Поле скорости u; б) График сходимости численного решения к аналитическому: 1 – аналитическое решение:

$u(y)=\frac{U}{\ln(r)}\cdot\ln(y)$ [6], 2 – численное решение на сетке 101×21, 3 – численное решение на сетке 201×41

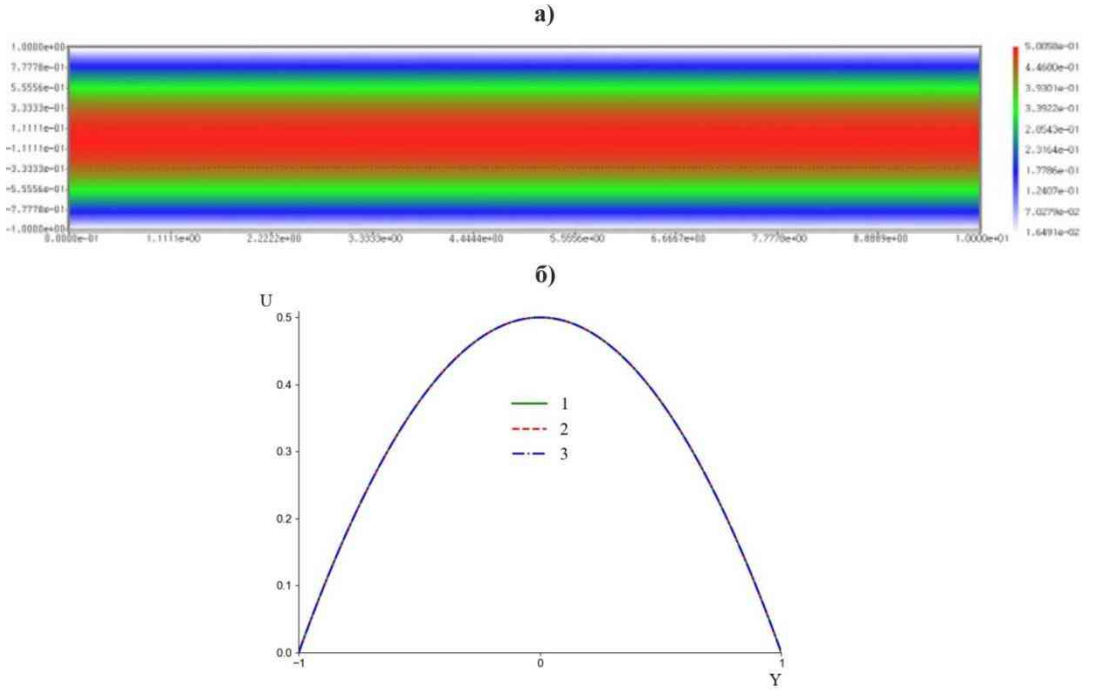


Рисунок 3 – Осесимметричная задача о течении Пуазейля: а) Поле скорости u; б) График сходимости численного решения к аналитическому: 1 – аналитическое решение: $u(y)=\frac{p_1-p_2}{2\mu}\cdot\left(h^2-y^2\right)$ [6], 2 – численное решение на сетке 101×61, 3 – численное решение на сетке 201×121

Таким образом, проведена верификация предложенного численного алгоритма: представленные численные решения хорошо согласуются с известными аналитическими профилями. В дальнейшем планируется применить разработанный алгоритм для моделирования задачи о тепловой конвекции, а также сопоставить его вычислительную сложность и точность с другими альтернативными методиками, такими как метод SIMPLE и его модификации.

Список литературы:

1. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. М.: Мир, 1983. 400 с.
2. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов / В.М. Головизнин, М.А. Зайцев, С.А. Карабасов, И.А. Короткин. М.: Изд-во Московского ун-та, 2013. 472 с.
3. Соковишин Ю.А. Введение в теорию свободно-конвективного теплообмена / Ю.А. Соковишин, О.Г. Мартыненко. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1982. 224 с.
4. Chorin A.J. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems // J. of Comput. Phys. 1967. Vol. 2. P. 12-26.
5. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Новосиб. гос. ун-т. Н.: Наука, 1967. 197 с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ В PYTHON С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕК MATPLOTLIB И TKINTER

Крупнова С.А., Романова М.Д.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

Python поддерживает ряд библиотек для построения научных графиков. Среди них Matplotlib является наиболее широко используемым инструментом для создания статичной, анимированной и интерактивной визуализации данных. Гибкость и низкоуровневый контроль над каждым элементом графики делают его незаменимым для построения сложных и публикационно-качественных изображений. Библиотека Tkinter входит в стандартную библиотеку Python, предоставляет надежный кроссплатформенный инструментарий для создания графических пользовательских интерфейсов (GUI). Использование Matplotlib для визуализации данных в простом и понятном интерфейсе, созданного с помощью Tkinter, позволяет разрабатывать самостоятельные, удобные для пользователя программы анализа данных. Это избавляет конечного пользователя от необходимости писать код и открывает доступ к сложной аналитике широкому кругу специалистов.

Интерфейс ПО визуализации данных

В приложении пользователя Tkinter визуализация данных осуществляется посредством библиотеки Matplotlib, предоставляющей возможности для создания высококачественных визуализаций данных типа линейных диаграмм, гистограмм, диаграмм разброса и прочих как в двумерном, так и в трехмерном режиме, в том числе анимации.

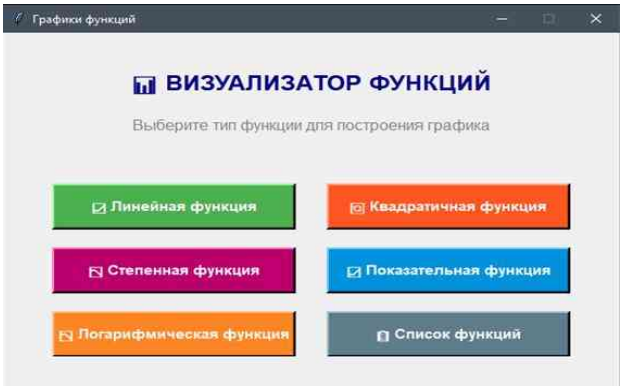
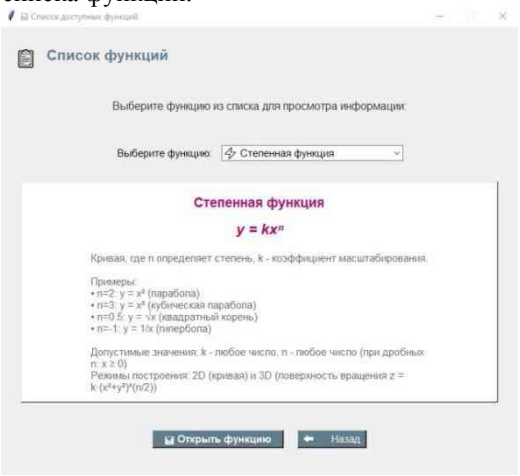
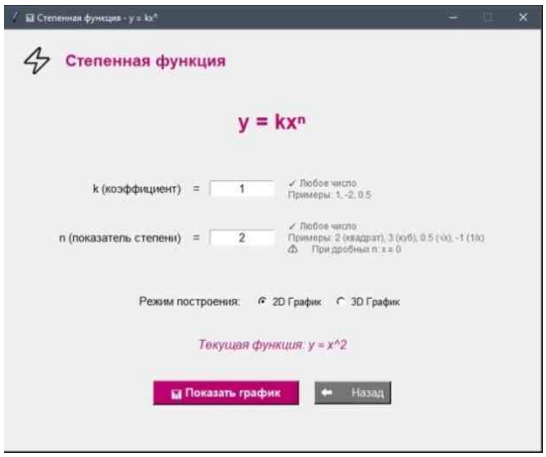


Рисунок 1 – Главное окно приложения

На следующих рисунках показан интерфейс приложения на примере выбранных из списка функций.





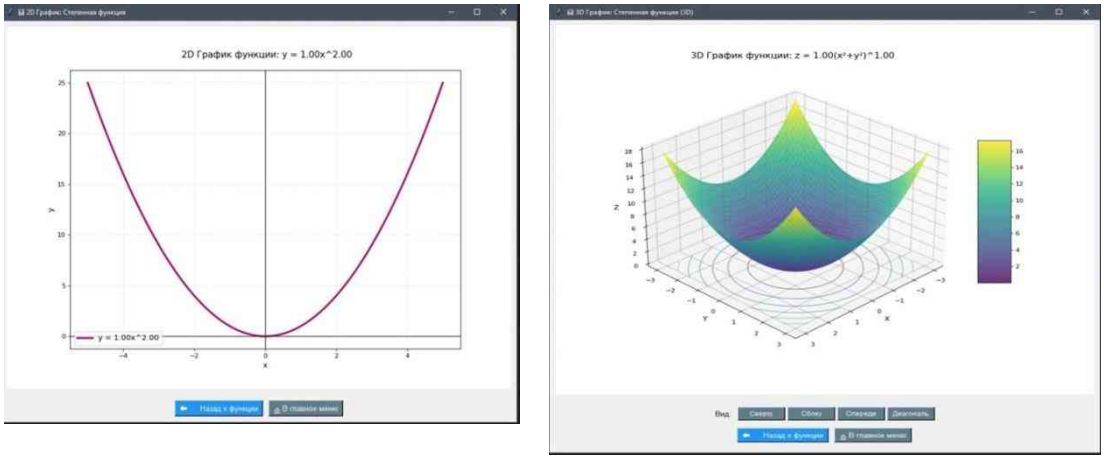


Рисунок 2 – Построение графиков степенной функции с заданными параметрами

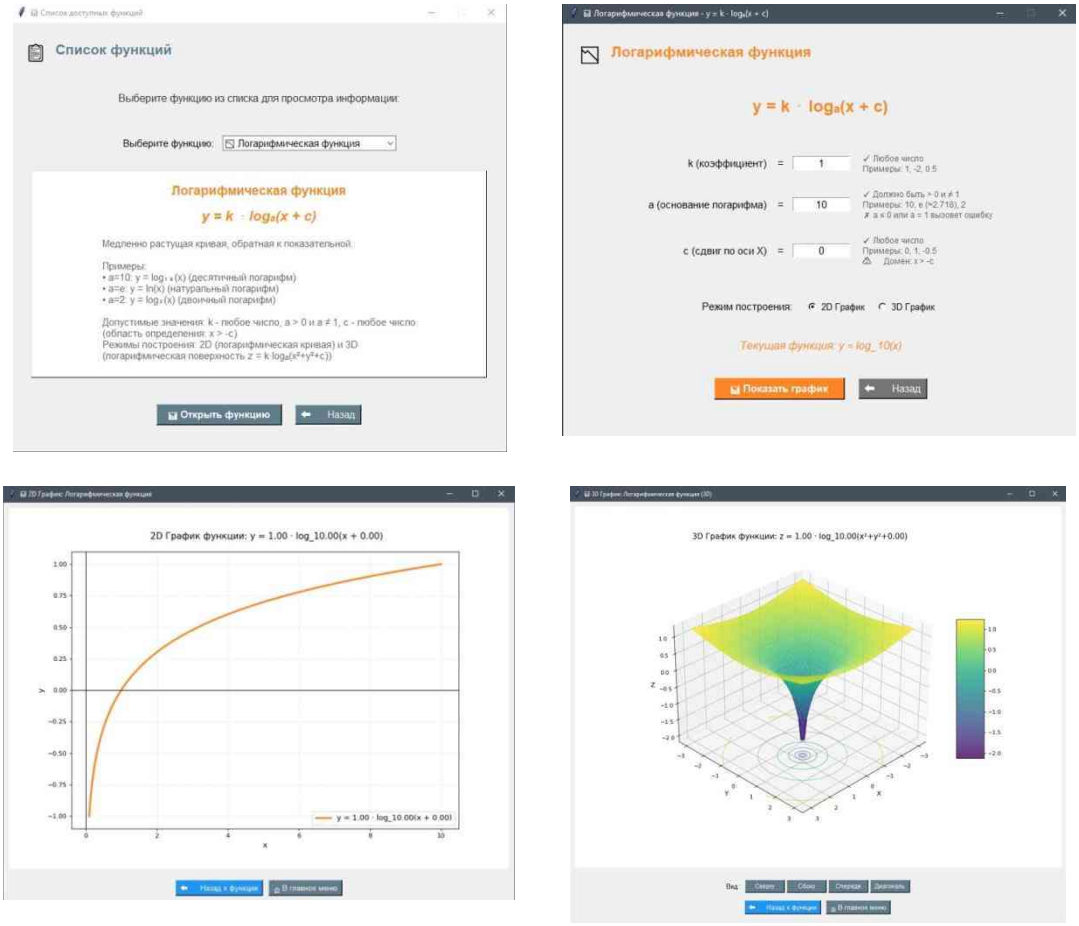


Рисунок 3 – Построение графиков логарифмической функции с заданными параметрами

Заключение

Главным назначением реализованного программного средства является предоставление пользователю, не обладающему какими-либо навыками в программировании, интуитивно понятного инструмента для решения задач визуализации с использованием библиотеки Matplotlib, границы возможностей которой в отрисовке графиков и работы с ними значительно расширяются. Библиотека постоянно развивается и предоставляет новый функционал.

Проделанная работа представляет собой практическое исследование возможностей Python в интеграции с библиотеками Matplotlib и Tkinter для построения аналитических графиков различных типов визуализации, вместе с тем, может служить основой для разработки более сложных систем визуализации данных, а также использоваться в качестве обучающего пособия. Работа выполнена на базе учебно-исследовательской лаборатории СарФТИ НИЯУ МИФИ.

Список литературы:

1. М.И. Абдрахманов. Книга «Библиотека Matplotlib», 2019. – 100 с.
2. А.Н. Титов, Р.Ф. Тазиева. «Визуализация данных в Python. Работа с библиотекой MatPlotLib», учебное-методическое пособие, 2022. – 92 с

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ СКОРОСТИ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Бадретдинов Р. В., Дмитриева А. П. , Нечаев Н. С.
Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Система регистрации

При разработке устройства выбор пал на пирометрический датчик AM312. Принцип действия данного датчика заключается в регистрации движения объектов с температурой человеческого тела.

В основе модуля AM312 лежит пироэлектрический инфракрасный сенсор, накрытый линзой Френеля [2]. Данная линза служит для увеличения области регистрации движущихся объектов, излучающих в ИК-диапазоне: она преломляет инфракрасные лучи, приходящие под разными углами, и фокусирует их на чувствительном элементе датчика.

Также для разработки устройства использовались:

Плата отладочная STM32 NUCLEO-F103RB [3,4];

OLED-дисплей ssd1306 [1];

Провода соединительные.

Исходя из работы пирометрического датчика, мы получаем математическую модель:

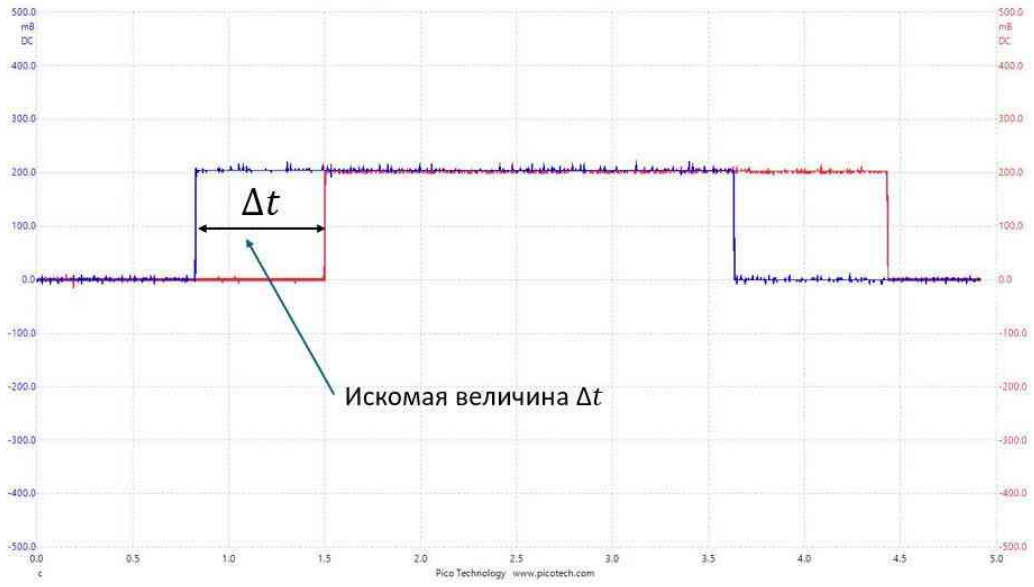


Рис.1. Математическая модель

Первый пирометрический датчик служит входным и срабатывает при прохождении объекта (синий сигнал на Рис.1.). На фиксированном расстоянии S = 80 мм от него расположен второй такой же датчик, который фиксирует выход тела и формирует нижний сигнал на том же рисунке. Измеряемая величина – временная разница между срабатываниями этих двух

датчиков. Подставляя полученное значение времени в формулу $\mathcal{V} = \frac{S}{\Delta t}$ мы определяем скорость движения объекта.

Для подключения портов ввод-вывод на микроконтроллере STM32F103RBTx была использована программа STM32CubeMX. Подключение внешних компонентов выполнено согласно схеме, представленной на Рис.2.

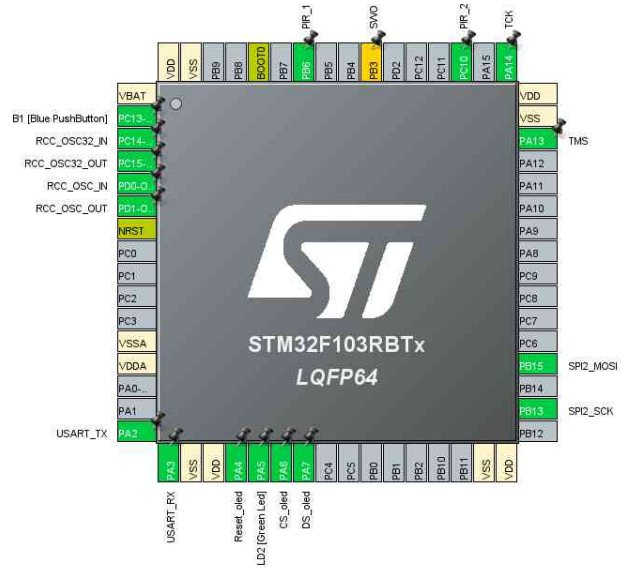


Рис.2. Схема подключения электронных компонентов к контактам платы

Датчики AM312 являются пассивными инфракрасными детекторами движения. Каждый датчик подключается к отдельному входу микроконтроллера.

Оба датчика питаются от общего источника 3.3 В. Выходы с датчиков были подключены на входы микроконтроллера: PIR_1 → PB6; PIR_2 → PC10.

Для отображения информации в устройстве применяется графический OLED-дисплей SSD1306. Он подключён к микроконтроллеру по интерфейсу SPI, что обеспечивает высокую скорость обмена данными (до 16 мегабит в секунду). Передача данных организована в режиме «только передача», так как обратный поток данных от дисплея не требуется. Питание дисплея осуществляется от шины 3.3 В. Линии тактирования и данных подключены к выводам, соответствующим аппаратному SPI2 микроконтроллера. Управляющие сигналы DC, CS и RES выведены на порты PA7, PA6 и PA4 соответственно. Такая конфигурация обеспечивает надёжное управление дисплеем и высокую скорость вывода информации. Таким образом, такое подключение обеспечивает надёжный сбор данных с двух датчиков движения и оперативное отображение информации на экране, что делает устройство наглядным и удобным для демонстрации.

Работа программы построена на принципе конечного автомата и использует два аппаратных таймера для выполнения временных интервалов и опроса датчиков. Блок-схема на рисунке 3 наглядно объясняет программную часть системы регистрации скорости.

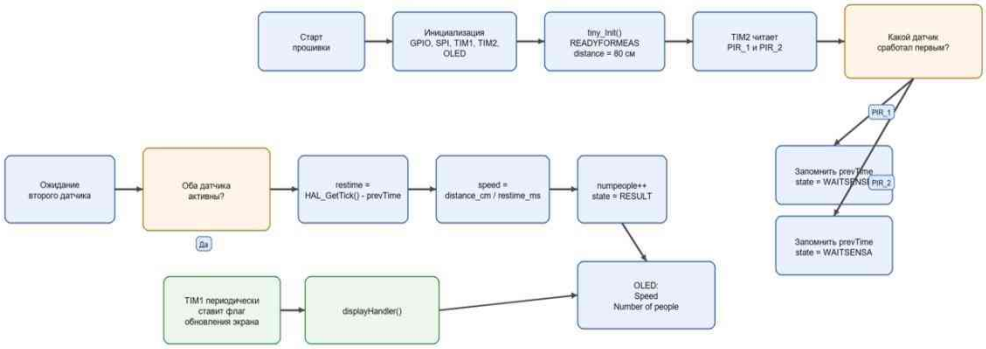


Рис.3. Блок-схема работы программы

После старта системы выполняется инициализация периферии, настраиваются порты ввода−вывода для подключения пирометрических датчиков, инициализируется таймер 2, который в циклическом режиме опрашивает состояние обоих датчиков. Запускается таймер 1, который периодически устанавливает флаг обновления экрана.

Программа переходит в состояние ГОТОВ К ИЗМЕРЕНИЯМ, в котором фиксируется расстояние 80 мм и система готова к измерению.

При срабатывании одного из датчиков алгоритм фиксирует, какой именно датчик сработал первым, и запоминает временную метку события. Затем программа переходит в состояние ожидания срабатывания второго датчика.

В этом состоянии:

Продолжается опрос датчиков через TIM2;

Если второе срабатывание происходит в течение заданного интервала времени, фиксируется временная метка второго события;

Если интервал превышен или срабатывает тот же датчик повторно, состояние сбрасывается, и система возвращается в режим ожидания.

После того, как оба датчика последовательно сработали, программа переходит в состояние ВЫЧИСЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТА:

Вычисляется разница времени между срабатываниями;

Зная фиксированное расстояние между датчиками, рассчитывается скорость движения;

Увеличивается счётчик количества прошедших людей.

Обновление экрана осуществляется обработчиком displayHandler(), который вызывается по флагу от таймера TIM1. На OLED−дисплее выводятся: рассчитанная скорость движения и текущее количество зарегистрированных людей.

Особенности алгоритма являются:

Фиксация первого сработавшего датчика позволяет определить направление;

Использование двух таймеров разгружает центральный процессор: TIM2 отвечает за опрос датчиков, а TIM1 за периодическое обновление дисплея;

Защита от ложных срабатываний.

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет достоверно фиксировать факт прохода человека, определять скорость его движения, вести подсчёт количества событий и отображать полученные данные на экране в режиме реального времени.

В результате проделанной работы разработана система регистрации скорости на основе пирометрических датчиков, которая потенциально может решить следующие проблемы:

Учет продукции: в горнодобывающей отрасли для точного подсчета объема перемещенного груза нужно знать скорость ленты конвейера;

Визуализация законов физики: студентам сложно понять абстрактные законы кинематики, если они не видят точных цифр в режиме реального времени;

Судейство: обеспечение честности соревнований путем автоматической фиксации результатов, исключая человеческий фактор.

Список литературы:
1. 0.96inch OLED (B) [Электронный ресурс] // Waveshare Wiki. – Режим доступа: https://www.waveshare.com/wiki/0.96inch_OLED_%28B%29 (дата обращения: 01.04.2026).
2. HW-740 DC 2.7-12V AM312 PIR Motion Body Human Sensor Mini PIR Infrared Pyroelectric Detector Module [Электронный ресурс] // Alexnld.com. – Режим доступа: https://www.alexnld.com/product/hw-740-dc-2-7-12v-am312-pir-motion-body-human-sensor-mini-pir-infrared-pyroelectric-detector-module/ (дата обращения: 01.04.2026).
3. Product Portfolio [Электронный ресурс] // STMicroelectronics. – Режим доступа: https://www.st.com/content/st_com/en/browse/product-portfolio.html (дата обращения: 01.04.2026).
4. STM32 32-bit Arm Cortex MCUs [Электронный ресурс] // STMicroelectronics. – Режим доступа: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html (дата обращения: 01.04.2026).

РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА, ПРЕДОСТАВЛЯЮЩЕГО БАЗОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОСТОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ФОРМАТЕ ЕФР И КОНВЕРТАЦИИ ИХ В ФОРМАТ VTK

Барышев И.О., Холушкин В.С., Алексеев В.В.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Современное инженерное проектирование и научные исследования всё чаще опираются на численное математическое моделирование. Однако при работе с сеточными данными — основой большинства вычислительных методов — исследователи сталкиваются с рядом серьёзных проблем: огромные объёмы информации (сотни гигабайт и более), множественность и несовместимость форматов хранения, сложность геометрии расчётных моделей, а также необходимость быстрой и наглядной визуализации результатов. Традиционные подходы, при которых конвертация и подготовка данных выполняются вручную или на стороне клиентского приложения, становятся неэффективными и ограничивают масштабируемость решений. Поэтому актуальной является задача создания промежуточного программного слоя — специализированного веб-сервиса, который берёт на себя обработку, конвертацию и подготовку сеточных данных для последующего анализа и визуализации [1].

Решение задач математического моделирования с использованием сеточных методов имеет свою специфику. Здесь важен масштаб и сложность геометрии, многомерность вычислительных задач, проблемы дискретизации и подготовки данных, а также проблема информационной перегрузки при визуализации. Эффективное управление сеточными данными требует применения специализированных подходов: кодирования топологии для минимизации памяти, иерархических представлений (Octree, k-d деревья) для ускорения пространственных запросов, а также параллельной и асинхронной обработки.

Структура сеточных данных включает узлы, ячейки, грани и рёбра, при этом способы описания топологии могут различаться. Существует несколько типов сеток. Структурированные сетки обладают регулярной топологией и простой индексацией, что делает их эффективными для простых геометрий. Неструктурированные сетки максимально гибки и подходят для сложных геометрий. Адаптивные сетки динамически изменяют плотность и форму элементов в процессе расчёта. Гибридные сетки сочетают преимущества разных типов в одной расчётной области. Форматы хранения сеточных данных также многообразны — от проприетарных форматов решателей (ANSYS, OpenFOAM) до универсальных обменных форматов (VTK, CGNS, HDF5). Наблюдается устойчивый тренд перехода на открытые, хорошо документированные форматы с поддержкой метаданных и сжатия [2].

Визуализация сеточных данных решается разными методами. Для скалярных полей применяются изоповерхности, изолинии, раскрашивание, срезы и объёмный рендеринг. Для векторных полей используются линии тока, траектории и глифы. Визуализация больших сеточных моделей требует управления уровнем детализации (LOD), применения параллельных вычислений и аппаратного ускорения на GPU. Сервис конвертации должен не только преобразовывать форматы, но и подготавливать данные для эффективной визуализации — в частности, строить иерархические представления и поддерживать потоковую передачу [3,4].

Архитектура веб-сервисов прошла заметную эволюцию. Ранние решения на основе XML-RPC и SOAP были сложными и избыточными. Современный стиль REST стал доминирующей парадигмой для публичных и внутренних API. Ключевые принципы REST включают единообразие интерфейса (идентификация ресурсов через URI и использование стандартных HTTP-методов), отсутствие состояния (каждый запрос независим), кэшируемость, слоистость и возможность передачи кода по требованию. Протокол HTTP предоставляет готовую семантику для реализации этих принципов: методы GET, POST, PUT, PATCH и DELETE выражают намерение клиента; коды состояния (2xx, 4xx, 5xx) стандартизируют обратную связь; заголовки управляют кэшированием, аутентификацией и форматами данных.

При сравнении архитектурных стилей выявляются их сильные и слабые стороны. Монолитная архитектура проста в разработке на начальных этапах, но плохо масштабируется и усложняет внесение изменений. Микросервисная архитектура позволяет независимо масштабировать и развёртывать отдельные компоненты, даёт свободу выбора технологий и повышает отказоустойчивость, однако требует дополнительной инфраструктуры — оркестрации, межсервисного взаимодействия, централизованного логирования. Для задачи обработки длительных ресурсоёмких операций конвертации сеточных данных наиболее подходит гибридный подход с элементами микросервисной архитектуры. Основной API-шлюз принимает запросы, а тяжёлые задачи конвертации выносятся в отдельные воркеры, взаимодействующие через очереди сообщений. Это позволяет использовать асинхронную обработку с возвратом клиенту статуса 202 Accepted и идентификатора задачи, что полностью соответствует принципам REST. Такой подход обеспечивает отзывчивость системы даже при обработке моделей объёмом в сотни гигабайт и позволяет горизонтально масштабировать вычислительные мощности независимо от уровня входящих запросов [5].

В рамках работы был разработан сервис, позволяющий производить конвертацию сеточных моделей ЕФР формата. Единый файловый разрез (ЕФР) – это библиотека ввода-вывода для доступа к файловым данным на многопроцессорных ЭВМ. В разработке использовались язык программирования Python, библиотека VTK и веб-фреймворк FastAPI. Проект разделен на несколько ключевых компонентов:

Routes – маршрутизация запросов;

Filters – применение фильтров к сеткам;

Converters – конвертация сеточных данных между форматами.

Архитектура сервиса представлена в трехуровневой структуре. На первом уровне описаны маршруты API. Отправка запросов вызывает функции, отвечающие за второй уровень. При отправке запросов указываются файлы, которые находятся на третьем уровне.

В формате ЕФР представлены 4 типа областей сетки: регулярные, нерегулярные, молекулярные и адаптивные.

В формате VTK структурированные сетки представляются через задание координат узлов и размерности сетки. Конвертация из ЕФР сводится к извлечению координат узлов и размерностей и построению из них сетки класса vtkStructuredGrid. При конвертации молекулярных сеток производится перенос узлов и их данных в vtkPolyData и дополнительно производится запись вертексов(ячейка, представляющая собой трехмерную точку) для более наглядного отображения при визуализации. Конвертация неструктурированных сеток в формат VTK заключается в извлечении данных о гранях и формировании на их основе ячеек класса vtkPolyhedron, определяемых набором многоугольных граней.

Цель работы достигнута. В рамках работы проведено её теоретическое обоснование, исследование предметной области, проектирование и реализация.

Список источников:

1. Gallagher R. S., Press S. (ed.). Computer visualization: graphics techniques for engineering and scientific analysis. – CRC press, 1994.

2. Shirley, P., Marschner, S. Fundamentals of Computer Graphics. – 4th ed. – CRC Press, 2015.

3. Cignoni, P., et al. The Visualization and Processing of Tensor Fields: Advances and Perspectives. – Springer, 2014.

4. Hansen C. D., Johnson C. R. Visualization handbook. – Elsevier, 2011.

5. Gu H. et al. Semantically realizing discovery and composition for RESTful web services //Computing. – 2024. – Т. 106. – №. 7. – С. 2361-2387.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ DODECANE SHOCK TUBE ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ РАВНОВЕСИИ СХЕМОЙ КАБАРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕЛАКСАЦИИ

Головня Н.А., Головизнин В.М.

Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Сарове, г. Саров

В данной работе рассматривается численное моделирование двухфазного течения на основе балансно-характеристической схемы КАБАРЕ [1]. Указанная схема относится к классу бездиссипативных, что обеспечивает высокую точность воспроизведения волновых структур без введения искусственной численной вязкости. В качестве математической модели используется модель Saurel-Abgrall [2], в рамках которой для каждой фазы записываются законы сохранения массы, импульса и полной энергии:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + H\frac{\partial \alpha_1}{\partial x} = S,$$

где U - вектор консервативных переменных, $F(U)$ - вектор потоков, H - вектор, учитывающий интерфейсную границу, а S - содержит источниковые члены, отвечающие за межфазную релаксацию. Развёрнутая запись векторов представлена ниже:

$$U = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_1\rho_1 \\ \alpha_1\rho_1 u_1 \\ \alpha_1\rho_1 E_1 \\ \alpha_2\rho_2 \\ \alpha_2\rho_2 u_2 \\ \alpha_2\rho_2 E_2 \end{pmatrix}, F(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_1\rho_1 u_1 \\ \alpha_1(\rho_1 u_1^2 + p_1) \\ \alpha_1 u_1(\rho_1 E_1 + p_1) \\ \alpha_2\rho_2 u_2 \\ \alpha_2(\rho_2 u_2^2 + p_2) \\ \alpha_2 u_2(\rho_2 E_2 + p_2) \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} u_I \\ 0 \\ -p_I \\ -u_I p_I \\ 0 \\ p_I \\ u_I p_I \end{pmatrix}, S$$

$$= \begin{pmatrix} \mu(p_2 - p_1) \\ 0 \\ \lambda(u_2 - u_1) \\ \lambda u_I(u_2 - u_1) + \mu p_I(p_2 - p_1) \\ 0 \\ -\lambda(u_2 - u_1) \\ -\lambda u_I(u_2 - u_1) - \mu p_I(p_2 - p_1) \end{pmatrix}.$$

Для описания термодинамических свойств каждой фазы $i = \overline{1,2}$ используется обобщённое уравнение состояния сильносжатого газа:

$$E_i = e + \frac{u_i^2}{2}, \quad e_i(\rho_i, p_i) = \frac{p_i + \gamma_i\pi_i}{\rho_i(\gamma_i - 1)} + q_i, \quad c_i(\rho_i, p_i) = \sqrt{\gamma_i\frac{p_i + \pi_i}{\rho_i}}, \quad c_{I,i}(\rho_i, p_i)$$

$$= \sqrt{\frac{p_i - p_I + \gamma(p_I + \pi_i)}{\rho_i}}.$$

Скорость интерфейса задаётся в виде средневзвешенной величины:

$$u_I = \frac{\alpha_1\rho_1 u_1 + \alpha_2\rho_2 u_2}{\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2}.$$

Давление на интерфейсе определяется как линейная комбинация давлений компонент с весами, зависящими от их объемных долей:

$$p_I = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2.$$

Плотность на межфазной границе определяется как эффективная (акустическая) плотность смеси, учитывающая вклад каждой фазы через скорости звука и объёмные доли:

$$\rho_I = \frac{\frac{\rho_1 c_1^2}{\alpha_1} + \frac{\rho_2 c_2^2}{\alpha_2}}{\frac{c_1^2}{\alpha_1} + \frac{c_2^2}{\alpha_2}}.$$

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки устойчивых и высокоточных численных методов для моделирования многокомпонентных сред, в

особенности в задачах, характеризующихся наличием ударных волн и релаксационных процессов. В качестве базового подхода традиционно используется метод Годунова, обладающий хорошими свойствами устойчивости, однако характеризующийся заметной численной диссипацией. Для повышения точности и корректного учёта релаксационных процессов в подобных схемах, как правило, применяются дополнительные процедуры аппроксимации источниковых членов.

В настоящей работе рассматривается постановка задачи в предположении механического равновесия фаз, что соответствует равенству скоростей $u_1 = u_2$ и давлений $p_1 = p_2$ компонентов смеси. Дополнительно предполагается режим мгновенной релаксации, при котором процессы межфазного выравнивания протекают на временных масштабах, существенно меньших характерного времени эволюции системы $\lambda, \mu \to \infty$.

Научная новизна работы заключается в применении неявной балансно-характеристической схемы КАБАРЕ для численного разрешения релаксационных источников, а также в сравнительном анализе двух алгоритмов итерационного решения релаксационной части системы на основе метода Ньютона: алгоритм с расщеплением по физическим процессам (P-U-релаксация), алгоритм без разделения переменных (PU-релаксация).

На этапе предиктора осуществляется вычисление промежуточных значений консервативных переменных без учёта источниковых членов:

$$\frac{U^0 - U^n_{j+1/2}}{\Delta t/2} + \frac{F^n_{j+1} - F^n_j}{\Delta x} + H^n_{j+1/2}\frac{{\alpha_1}^n_{j+1} - {\alpha_1}^n_j}{\Delta x} = 0.$$

Этот шаг соответствует решению гиперболической части системы и обеспечивает перенос физических величин вдоль характеристик.

Далее решается релаксационная система:

$$\frac{U^{n+1/2}_{j+1/2} - U^0}{\Delta t/2} = S^{n+1/2}_{j+1/2},$$

где

$$S^{n+1/2}_{j+1/2} = \begin{pmatrix} \mu\left({p_2}^{n+1/2}_{j+1/2} - {p_1}^{n+1/2}_{j+1/2}\right) \\ 0 \\ \lambda\left({u_2}^{n+1/2}_{j+1/2} - {u_1}^{n+1/2}_{j+1/2}\right) \\ \lambda u_I^0\left({u_2}^{n+1/2}_{j+1/2} - {u_1}^{n+1/2}_{j+1/2}\right) + \mu p_I^0\left({p_2}_{j+1/2} - {p_1}^{n+1/2}_{j+1/2}\right) \\ 0 \\ -\lambda\left({u_2}^{n+1/2}_{j+1/2} - {u_1}^{n+1/2}_{j+1/2}\right) \\ -\lambda u_I^0\left({u_2}^{n+1/2}_{j+1/2} - {u_1}^{n+1/2}_{j+1/2}\right) - \mu p_I^0\left({p_2}_{j+1/2} - {p_1}^{n+1/2}_{j+1/2}\right) \end{pmatrix}.$$

Полученные значения используются на следующем этапе для построения потоков. Этап генерации потоков основан на переходе к характеристическим переменным и использовании инвариантов Римана:

$$I_1 = \alpha_1,$$

$$I_2 = \alpha_1\left[\frac{c_1(p_1 - p_I) + \rho_1 c_{I,1}^2(u_1 - u_I)}{\alpha_1(c_1 + u_1 - u_I)}\right] + u_1[c_1\rho_1] + p_1,$$

$$I_3 = \alpha_1\left[\frac{\rho_1\left(c_{I,1}^2 - c_1^2\right)}{\alpha_1}\right] + \rho_1[c_1^2] + p_1,$$

$$I_4 = \alpha_1\left[\frac{c_1(p_I - p_1) + \rho_1 c_{I,1}^2(u_1 - u_I)}{\alpha_1(-c_1 + u_1 - u_I)}\right] - u_1[c_1\rho_1] + p_1,$$

$$I_5 = \alpha_1\left[\frac{c_2(p_I - p_2) + \rho_2 c_{I,2}^2(u_I - u_2)}{\alpha_2(c_2 + u_2 - u_I)}\right] + u_2[c_2\rho_2] + p_2,$$

$$I_6 = \alpha_1\left[\frac{\rho_2\left(c_{I,2}^2 - c_2^2\right)}{\alpha_2}\right] - \rho_2[c_2^2] + p_2,$$

$$I_7 = \alpha_1\left[\frac{c_2(p_2 - p_I) + \rho_2 c_{I,2}^2(u_I - u_2)}{\alpha_2(-c_2 + u_2 - u_I)}\right] - u_2[c_2\rho_2] + p_2.$$

Далее выполняется экстраполяция характеристических величин по правилу:

$$I_R^{n+1} = 2I_{j+1/2}^{n+1/2} - I_{j+1}^n, \quad I_L^{n+1} = 2I_{j-1/2}^{n+1/2} - I_{j-1}^n.$$

Для обеспечения монотонности и устранения нефизичных осцилляций вблизи разрывов проводится процедура нелинейной коррекции:

$$maxI_L = max\left[I_{j-1}^n, I_{j-1/2}^n, I_{j-1/2}^{n+1/2}, I_L^n\right] + \Delta t\,\omega_L,$$
$$maxI_R = max\left[I_{j+1}^n, I_{j+1/2}^n, I_{j+1/2}^{n+1/2}, I_R^n\right] + \Delta t\,\omega_R,$$

где

$$\omega_L = \frac{I_{j-1/2}^{n+1/2} - I_{j-1/2}^n}{\Delta\, t/2} + \Lambda_{j-1/2}^{n+1/2}\frac{I_L^n - I_{j-1}^n}{\Delta x},$$
$$\omega_R = \frac{I_{j+1/2}^{n+1/2} - I_{j+1/2}^n}{\Delta\, t/2} + \Lambda_{j+1/2}^{n+1/2}\frac{I_{j+1}^n - I_R^n}{\Delta x}.$$

Если $I_L^{n+1} \geq maxI_L$, тогда $I_L^{n+1} = maxI_L$, если $I_L^{n+1} \leq mi\,nI_L$, то $I_L^{n+1} = mi\,nI_L$.
Если $I_R^{n+1} \geq maxI_R$, тогда $I_R^{n+1} = maxI_R$, если $I_R^{n+1} \leq mi\,nI_R$, то $I_R^{n+1} = mi\,nI_R$.
Значения Λ определяются из задачи на собственные значения для матрицы

$$A = \begin{pmatrix} u_I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\rho_1(u_1 - u_I)}{\alpha_1} & u_1 & \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p_1 - p_I}{\alpha_1\rho_1} & 0 & u_1 & \frac{1}{\rho_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\rho_1 c_{I,1}^2(u_1 - u - I)}{\alpha_1} & 0 & \rho_1 c_1^2 & u_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\rho_2(u_2 - u_I)}{\alpha_2} & 0 & 0 & 0 & u_2 & \rho_2 & 0 \\ -\frac{p_2 - p_I}{\alpha_2\rho_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & u_2 & \frac{1}{\rho_2} \\ -\frac{\rho_2 c_{I,2}^2(u_2 - u - I)}{\alpha_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_2 c_2^2 & u - 2 \end{pmatrix}.$$

После чего проводится восстановление физических переменных в узлах сетки с учётом направления распространения волн:

$$[\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0, \lambda_3 \geq 0, \lambda_4 < 0, \lambda_5 \geq 0, \lambda_6 \geq 0, \lambda_7 < 0],$$
$$[\lambda_1 < 0, \lambda_2 \geq 0, \lambda_3 < 0, \lambda_4 < 0, \lambda_5 \geq 0, \lambda_6 <, \lambda_7 < 0],$$
$$[\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0, \lambda_3 \geq 0, \lambda_4 \geq 0, \lambda_5 \geq 0, \lambda_6 \geq 0, \lambda_7 \geq 0],$$
$$[\lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0, \lambda_3 < 0, \lambda_4 < 0, \lambda_5 < 0, \lambda_6 <, \lambda_7 < 0].$$

На заключительном этапе — этапе корректора — производится обновление консервативных переменных на новом временном слое с учётом вычисленных потоков и источниковых членов:

$$\frac{U_{j+1/2}^{n+1} - U_{j+1/2}^{n+1}}{\Delta\, t/2} + \frac{F_{j+1}^{n+1} - F_j^{n+1}}{\Delta x} + H_{j+1/2}^{n+1/2}\frac{\alpha_1{}_{j+1}^{n+1} - \alpha_1{}_j^{n+1}}{\Delta x} = S_{j+1/2}^{n+1/2}.$$

Для численного разрешения релаксационных источников используется метод Ньютона, применяемый к нелинейной системе уравнений, возникающей после этапа предиктора. В данном подходе решается полная система нелинейных уравнений относительно всех искомых переменных, что позволяет учитывать их взаимосвязь в рамках единой итерационной процедуры.

Алгоритм с расщеплением (P-U-релаксация). Данный подход основан на разбиении исходной системы на две подсистемы, описывающие релаксацию скорости и давления, которые решаются последовательно. На каждой итерации по текущему приближению $u^k = (u_1^k, u_2^k)^T$ формируется вектор невязки

$$L(u^k) = \begin{pmatrix} A_1(u_1^k - u_1^0) - \frac{\Delta t}{2}\lambda(u_2^k - u_1^k) \\ A_4(u_2^k - u_2^0) + \frac{\Delta t}{2}\lambda(u_2^k - u_1^k) \end{pmatrix},$$

где $u_i{}^0$ — скорости после гиперболического шага, $\lambda \approx 10^{15}$ — коэффициент релаксации, $A_1 = (\alpha_1\rho_1)^0, A_4 = (\alpha_2\rho_2)^0$, и матрица Якоби

$$J = \begin{pmatrix} A_1 + \frac{\Delta t}{2} & \frac{\Delta t}{2}\lambda \\ \frac{\Delta t}{2}\lambda & A_4 + \frac{\Delta t}{2} \end{pmatrix}.$$

Поправка к решению определяется из линейной системы $J\delta u = -L$, после чего выполняется обновление $u^{k+1} = u^k + \delta u$. Итерационный процесс продолжается до выполнения условия сходимости по норме приращения скоростей. После этапа релаксации скоростей выполняется выравнивание давлений фаз
и корректировка объёмной доли фаз $x^k = (\alpha_1^k, p_1^k, p_2^k)^T$.
Алгоритм без расщепления (PU-релаксация). В данном подходе решается полная система нелинейных уравнений относительно всех искомых переменных, что позволяет учитывать их взаимосвязь в рамках единой итерационной процедуры.
Оба алгоритма протестированы на задаче Dodecane Shock Tube [2].

Список литературы:

1. Головизнин В. М. Балансно-характеристический метод численного решения одномерных уравнений газовой динамики в эйлеровых переменных // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18, № 11. – С. 14 – 30.
2. Hantke M. Two-Phase Flows with Phase Transitions: Modelling – Analysis – Numerics : Habilitation thesis // M. Hantke. – Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universitat Magdeburg, 2018. – (Dr. rer. nat. habil.).

ДОКУМЕНТООБОРОТ НА БЛОКЧЕЙНЕ

Андронов Е.А.[1], Копылов К.С.[1], Шкаев Р.Е.[2]
[1]Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров
[2]ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

В докладе представляется блокчейн-система ChainDocs, предназначенная для защиты документов с использованием мультиподписей и криптографических механизмов. Рассмотрены архитектура системы, реализованные функции (динамический консенсус, отзыв ключей, категоризация документов)[1], а также планы по сертификации и автоматизации развёртывания. Показано, что предложенное решение обеспечивает неизменяемость записей и математически доказуемую подлинность документов без необходимости доверять единому посреднику.

Технология блокчейна часто ассоциируется исключительно с криптовалютами, однако её потенциал в области документооборота значительно шире. Блокчейн представляет собой распределённый реестр, информация в котором разбита на блоки, соединённые в неразрывную цепочку. Благодаря тому, что копия реестра хранится одновременно у множества участников, становится невозможным скрытое удаление или изменение записей. Это свойство обеспечивает прозрачность и безопасность без участия доверенной третьей стороны.

Разработанная система ChainDocs использует именно эти принципы. Ключевыми возможностями системы являются: неизменяемость документов, фиксируемая в блокчейне; механизм мультиподписей, требующий подтверждения документа несколькими независимыми клиентами; динамический консенсус, при котором операция считается подтверждённой после получения 51%[2] голосов от активных участников. Дополнительно реализована поддержка категорий документов и массовой загрузки. Потенциальными пользователями системы выступают учебные заведения (для защиты дипломов), юридические фирмы (для договоров), медицинские учреждения (для историй болезни) и финансовый сектор. Типичный сценарий работы: университет загружает диплом, три независимых клиента подписывают его, достигается консенсус, и документ навсегда защищается в блокчейне. Подделка документа задним числом становится криптографически невозможной.

Архитектура ChainDocs является гибридной. Центральный сервер координирует работу, хранит блокчейн, предоставляет API и WebSocket-соединения для мгновенных уведомлений. Клиентские узлы, в свою очередь, образуют P2P-сеть]. Процесс работы включает следующие этапы:

- сервер создаёт блок на основе загруженного документа;
- клиенты получают уведомление и подписывают блок своими закрытыми ключами;
- между собой клиенты взаимодействуют по Gossip-протоколу[3], согласуя подписи;
- после достижения кворума сервер фиксирует блок в цепочке.

Для обеспечения безопасности применяются криптография Ed25519 (для подписей)[4] и алгоритм AES-256-GCM (для шифрования ключей)[5]. В системе также реализованы отзыв ключей и отслеживание активности клиентов.

Разработан веб-интерфейс, предоставляющий пользователю следующие возможности. Обзорная страница (дашборд) содержит боковое меню (дашборд, блоки, файлы, проверка документа, категории, загрузки, ключи) и сводную информацию о количестве блоков, ключей, активных клиентов и документов. На вкладке «Блоки» отображается список блоков с параметрами: хэш блока, хэш документа, количество подписей, статус, дата и время; доступна кнопка для детального просмотра. При детальном просмотре блока можно увидеть не только время добавления в цепочку, но и моменты подписания каждым клиентом, идентификатор клиента, а также хэши документа, блока и предыдущего связанного блока.

Вкладка «Проверка документа» позволяет загрузить файл и определить, присутствует ли он в блокчейне. Если документ найден, система выводит подробную информацию о нём; если нет – сообщает об отсутствии. Вкладка «Файлы» реализована по принципу простой файловой системы, доступной администратору. Поддерживается как поштучная загрузка документов, так и загрузка целыми каталогами. Для удобства классификации введены категории документов. При загрузке пользователь выбирает категорию, после чего документ автоматически помещается в соответствующую папку. Загрузка ограничена 50 файлами единовременно, что позволяет сохранять эффективность работы без избыточной нагрузки на сервер. На текущий момент поддерживаются только PDF-файлы – это упрощает реализацию на данном этапе проекта. Панель управления публичными ключами клиентов даёт возможность отслеживать состояние каждого клиента и оценивать «подписательную способность» системы в целом.

Планы по развитию системы включают два ключевых направления. Во-первых, подача заявки на сертификацию продукта. Получение сертификата позволит использовать ChainDocs не только для внутренних нужд, но и как юридически значимое обоснование подлинности документов в суде или при аудите. Во-вторых, создание плагинов для автоматического развёртывания. В настоящее время установка требует определённых знаний, и упрощение этого процесса сделает систему доступной для широкого круга пользователей.

На текущий момент система ChainDocs имеет статус Production Ready**.** Реализовано 95% необходимого для промышленной эксплуатации функционала: динамический консенсус, самовосстановление ключей, полноценный веб-интерфейс, скрипты резервного копирования. ChainDocs представляет собой не просто хранилище файлов, а инфраструктуру доверия, обеспечивающую математически доказанную гарантию подлинности документов.

Список литературы:

1. Колесник Г. В., Безделов С. А. Основы технологии распределённых реестров : учебник. — М. : КНОРУС, 2025. — 245 с.
2. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. — 2008.
3. Nicolaou N., Obi O., Rajasekaran A., et al. OptimumP2P: Fast and Reliable Gossiping in P2P Networks // arXiv preprint. — 2025.
4. Bernstein D. J., Duif N., Lange T., et al. High-speed high-security signatures // Journal of Cryptographic Engineering. — 2012. — Vol. 2, № 2. — P. 77–89. (Ed25519)
5. Dworkin M. Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC // NIST Special Publication 800-38D. — 2007.

ФАЙЛООБМЕННИК РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФСТЭК НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ GO

Копылов К.С.[1], Андронов Е.А.[1], Шкаев Р.Е.[2]
[1]Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров
[2]ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

В докладе изложены итоги создания и проверки защищённого файлообменника для распределённых сетей на языке Go. Описано, как на практике выполнены требования ФСТЭК России: механизмы проверки подлинности с блокировкой учётной записи после трёх неверных попыток входа, автоматическое завершение работы через 15 минут бездействия, ролевая модель доступа (Sender, Receiver, Administrator) и система учёта событий безопасности. Проведена оценка соответствия разработанного программного обеспечения Приказу ФСТЭК № 117 [1] и ГОСТ Р 56939-2024 по безопасной разработке ПО [3]. Показано, что применение языка Go даёт высокое быстродействие, работу на разных платформах и встроенную поддержку параллельных вычислений, что важно для распределённых систем обмена файлами. Приведены итоги тестирования и планы по дальнейшему улучшению системы для полного соответствия классам защищённости ФСТЭК.

С 1 марта 2026 года начали действовать новые Требования к защите информации в государственных информационных системах. Они утверждены Приказом ФСТЭК России № 117, который заменил Приказ № 17 и внёс значительные изменения в правила защиты данных [1]. Новый документ распространяется на все информационные системы государственных органов, унитарных предприятий и учреждений. Он вводит обязательные меры: установление личности и проверку подлинности, управление доступом, запись событий безопасности и защиту каналов передачи данных [2].

Разработка программных систем для государственных и муниципальных нужд теперь также должна отвечать требованиям ГОСТ Р 56939-2024 «Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования». Этот стандарт введён в декабре 2024 года [3]. Он устанавливает общие правила по содержанию и порядку работ, связанных с созданием безопасного программного обеспечения и устранением найденных уязвимостей [4].

Язык программирования Go (Golang) хорошо подходит для создания таких систем. Причины: встроенная поддержка параллельных задач, удобная работа с сетевыми протоколами, возможность запуска на разных платформах и наличие библиотек для современных криптографических алгоритмов. Цель данной работы — описать, как на практике реализован файлообменник для распределённой сети на языке Go с учётом действующих требований ФСТЭК.

Разработанный файлообменник построен по одноранговой (peer-to-peer) архитектуре. Используются открытые протоколы и библиотеки для автоматического поиска узлов в сети. Все передаваемые файлы шифруются перед отправкой с помощью алгоритма AES-256. Это даёт сквозное шифрование и не позволяет третьим лицам получить данные.

В системе реализованы следующие механизмы защиты в соответствии с требованиями ФСТЭК:

Система использует уникальные идентификаторы пользователей. Требования к паролю: минимум 8 символов, обязательное присутствие заглавных букв, цифр и специальных символов. Эти требования соответствуют правилам блокировки учётной записи из нормативных документов ФСТЭК [5], где указано число неудачных попыток входа, после которого наступает блокировка.

Если число неверных попыток проверки подлинности превышает допустимое, учётная запись пользователя блокируется автоматически [5]. Также введена задержка между попытками, чтобы замедлить перебор паролей.

Система следит за действиями пользователя и принудительно завершает сеанс после заданного времени бездействия. Это соответствует требованиям ФСТЭК к блокированию сеанса доступа [1].

Внедрена дискреционная модель управления доступом с тремя предустановленными ролями:

Перечень регистрируемых событий определён по национальному стандарту ГОСТ Р 59548-2022 «Защита информации. Регистрация событий безопасности. Требования к регистрируемой информации» [6]. Каждое событие фиксируется с отметкой времени и данными о пользователе. Журналы хранятся в зашифрованном виде с защитой от изменений.

Каждый сеанс проверки подлинности использует временные метки и уникальные nonce-значения. Это не даёт возможности повторно использовать перехваченные пакеты аутентификации. Данный механизм соответствует рекомендациям по защите каналов связи [1].

При передаче файлов вычисляется криптографическая хеш-сумма (SHA-256). Получатель проверяет её, чтобы убедиться в целостности данных. Этот механизм

соответствует требованиям ФСТЭК к обеспечению целостности информации при передаче по каналам связи [5].

Разработанная система выполняет следующие ключевые меры защиты, установленные Приказом ФСТЭК № 117 [1]: установление личности и проверка подлинности, управление доступом, запись событий безопасности, защита каналов передачи данных и защита конечных устройств [2].

Процесс разработки ведётся согласно положениям ГОСТ Р 56939-2024 [3]. Он включает планирование этапов безопасной разработки, анализ угроз, моделирование возможного нарушителя, экспертизу и анализ кода, а также проверку цепочек поставок зависимостей [4]. В рамках требований к формальным моделям управления доступом разработана и задокументирована формальная модель ролевого доступа для сертифицированного средства защиты информации.

В докладе представлена практическая реализация защищённого файлообменника для распределённой сети на языке Go. Система частично соответствует действующим требованиям ФСТЭК России. Она включает механизмы проверки подлинности с блокировкой после трёх неверных попыток, автоматическое завершение сеанса через 15 минут бездействия, ролевую модель доступа с тремя предустановленными ролями и систему учёта событий безопасности. Дополнительные механизмы (защита от replay-атак, проверка целостности) повышают общий уровень защищённости системы. Дальнейшие исследования направлены на внедрение криптографических алгоритмов ГОСТ и сертификацию разработанного программного обеспечения в системах ФСТЭК.

Список литературы:

1. Приказ ФСТЭК России от 11.04.2025 № 117 "Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений" (зарегистрирован в Минюсте России 16.06.2025 № 82619). URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/412075328/
2. Сдобникова И. Приказ ФСТЭК №117: что изменится для ГИС с 1 марта 2026 года // Anti-Malware.ru. 2025. URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/FSTEC-Order-No-117
3. ГОСТ Р 56939-2024 "Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 24.10.2024 № 1504-ст). М.: Стандартинформ, 2024.
4. В России вступил в силу ГОСТ на безопасную разработку ПО. Как теперь проходить сертификацию // Tadviser. 2026. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:ГОСТ_Р_56939-2024_Защита_информации._Разработка_безопасного_ПО
5. Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 (ред. от 28.08.2024) "Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации". URL: https://base.garant.ru/71901880/
6. ГОСТ Р 59548-2022 "Защита информации. Регистрация событий безопасности. Требования к регистрируемой информации" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 13.01.2022 № 2-ст). М.: Стандартинформ, 2022.

УМНЫЙ ПОИСК СВОБОДНЫХ АУДИТОРИЙ

Савельев Н.С., Рябков А.В.

Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Введение

В процессе обучения в университете часто возникает необходимость быстро найти свободную аудиторию. Это может быть связано с подготовкой к занятиям, самостоятельной работой или проведением встреч. Однако существующие решения не всегда удобны. Расписание университета представлено в виде таблицы, которая не всегда удобна для быстрого анализа и поиска свободной аудитории. Кроме того, отсутствуют инструменты, позволяющие в реальном времени определить доступность аудиторий.

В связи с этим возникает задача разработки системы, которая позволит упростить поиск свободных помещений и повысить удобство работы с расписанием.

Целью данной работы является разработка веб-приложения, позволяющего быстро находить свободные аудитории в каждом из корпусов СарФТИ НИЯУ МИФИ на основе расписания университета.

Основная задача системы — предоставить пользователю возможность оперативно получить ответ на вопрос: “Какая аудитория сейчас свободна?”.

Архитектура системы

Разрабатываемое приложение построено по архитектуре fullstack и включает три основные компонента: клиентская часть (frontend), серверная часть (backend) и база данных [1]. Frontend отвечает за отображение информации и взаимодействие с пользователем. Backend реализует бизнес-логику и обработку запросов. База данных обеспечивает хранение информации.

Взаимодействие между клиентской и серверной частями осуществляется через API, что делает систему гибкой и расширяемой.

Используемые технологии

В проекте используется современный стек технологий.

Серверная часть реализована на языке Python, который позволяет эффективно разрабатывать backend-логику и обладает широким набором библиотек для веб-разработки.

Клиентская часть разработана с использованием React и TypeScript [3]. React обеспечивает компонентный подход к созданию интерфейсов, что упрощает поддержку и развитие проекта. TypeScript добавляет строгую типизацию, что повышает надёжность кода и снижает количество ошибок [4].

Для хранения данных используется реляционная база данных с поддержкой SQL.

Данный стек широко применяется в современной разработке веб-приложений и обеспечивает масштабируемость и надёжность системы.

Реализация Backend

Backend является ключевой частью системы, так как отвечает за обработку данных и бизнес-логику.

Сервер реализует API, через которое осуществляется взаимодействие с frontend — клиентской частью веб-приложения. При поступлении запроса сервер обращается к базе данных, обрабатывает информацию и возвращает результат пользователю.

Например, при запросе на поиск свободных аудиторий в определённом корпусе сервер анализирует расписание университета СарФТИ НИЯУ МИФИ и определяет доступность помещений в реальном времени.

API и взаимодействие компонентов

Взаимодействие между frontend и backend реализовано с использованием REST API. Он обеспечивает предсказуемый способо взаимодействия между клиентской и серверной частями.

Данный подход предполагает обмен данными через HTTP-запросы. Клиент отправляет запрос к серверу, сервер обрабатывает его и возвращает ответ в стандартном формате, например JSON.

Использование REST API позволяет: разделить систему на независимые компоненты, упростить разработку и тестирование, обеспечить возможность масштабирования, интегрировать систему с другими сервисами.

Реализация Frontend

Frontend представляет собой пользовательский интерфейс приложения — внешнее составляющее веб-приложения.

Он реализован с использованием React и TypeScript. Интерфейс построен на основе компонентов, что делает структуру проекта более понятной и удобной для поддержки, а также разработан с помощью современных подходов и стилей оформления веб-приложения для удобства взаимодействия с ним как обычным пользователям, так и самим разработчикам.

Основная задача frontend — обеспечить удобное взаимодействие пользователя с системой и наглядное отображение данных.

База данных

Для хранения информации используется реляционная база данных [2].

В базе данных хранятся основные сущности системы, а именно: аудитории, преподаватели, корпуса университета и расписание на ближайшие недели.

В проекте применяются миграции базы данных, которые позволяют управлять изменениями структуры базы данных без потери данных. Это стандартный подход, широко используемый в промышленной разработке.

Заключение

В результате выполнения работы было разработано веб-приложение для поиска свободных аудиторий.

Система реализована с использованием современной архитектуры и технологий и решает практическую задачу, актуальную для образовательных учреждений.

Разработанное приложение может быть использовано в реальной среде и имеет потенциал для дальнейшего развития, включая расширение функционала и улучшение пользовательского интерфейса, например: добавление расписания для удобного взаимодействия с ним без перехода на другие веб-страницы, возможность добавлять админов в админ-панель для ручного изменения расписания, создание учебного плана каждой из групп.

Список литературы:

1. Швецов В.И., Визгунов А.Н., Мееров И.Б. Базы данных.- Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2004.- 267с.
2. Шилдс У. SQL: быстрое погружение. — СПб.: Питер, 2022. — 224 с.
3. Стефанов С. React. Быстрый старт, 2-е изд. — СПб.: Питер, 2023. — 304 с.
4. Баумгартнер С. Рецепты TypeScript. — СПб.: Питер, 2025. — 432 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УСТОЙЧИВОСТИ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОБОБЩЁННЫХ ИНДЕКСОВ КИРХГОФА

Ахметова К.Н.[1], Матвеев С.А.[2]

[1]*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, филиал МГУ в г. Сарове, г.Саров*

[2]*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г.Москва*

Введение

В теории сложных сетевых систем ключевым вопросом является оценка устойчивости системы к внешним возмущениям. Проблема возникает при анализе динамики растущих сетей, так как необходимость многократного пересчёта характеристик устойчивости при добавлении новых узлов требует применения эффективных вычислительных методов. В данной работе в качестве меры глобальной устойчивости сети используется индекс Кирхгофа, который был введен D. J. Klein и M. Randi´c в 1993 году и определен как эффективное сопротивление между парами вершин [1]. В работе [2] предложены аналитические выражения для эволюции индекса Кирхгофа при добавлении новых узлов в сеть и показано, что асимптотическое масштабирование $Kf1/N$ зависит от стратегии выбора существующих узлов для подключения. Цель работы: численное моделирование двух сценариев: $m = 1$ (новый узел соединяется с одним существующим) и $m = 2$ (новый узел соединяется с двумя существующими). По итогам работы были реализованы наборы программ на языке Python, моделирующих различные стратегии роста, и проведён анализ полученных зависимостей.

Основная часть

Математический аппарат

Рассмотрим неориентированный связный граф $G = (V, E)$ с $n = |V|$ вершинами и $m = |E|$ рёбрами. Матрица смежности A размера $n \times n$ имеет элементы $A_{ij} = 1$, если вершины i и j соединены ребром, и 0 в противном случае. Диагональная матрица степеней $D = diag(d_1, \dots, d_n)$, где $d_i = \sum_{j=1}^{n} A_{ij}$. Матрица Лапласа определяется как $L = D - A$. Для связного графа L симметрична, положительно полуопределена и имеет единственное нулевое собственное значение $\lambda_1 = 0$ с собственным вектором $\mathbf{1} = (1,1,\dots,1)^T$

Псевдообратная матрица L^+ (матрица Мура–Пенроуза) может быть вычислена через спектральное разложение $L = U\Lambda U^T$, где $\Lambda = diag(0, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, а U — матрица ортонормированных собственных векторов. Тогда $L^+ = U\Lambda^+ U^T$, где $\Lambda^+ = diag(0, 1/\lambda_2, \dots, 1/\lambda_n)$. Эффективное сопротивление между вершинами i и j выражается через элементы L^+:

$$\Omega_{ij} = [L^+]_{ii} - 2[L^+]_{ij} + [L^+]_{jj} \quad (1)$$

Индекс Кирхгофа Kf определяется как сумма эффективных сопротивлений по всем парам вершин и может быть записан как

$$Kf = \sum_{i<j} \Omega_{ij} = n \sum_{\alpha=2}^{n} \frac{1}{\lambda_\alpha} = nTr(L^+) \quad (2)$$

Центральность узла по сопротивлению, характеризующая локальную уязвимость, даётся выражением

$$C(i) = \left([L^+]_{i\,i} + \frac{Kf}{n^2}\right)^{-1} \quad (3)$$

Данная формула устанавливает прямую связь между локальными свойствами узла, то есть диагональным элементом L^+ и глобальной характеристикой сети Kf [3].

Вычислительная реализация

Все вычисления выполняются прямым методом с использованием библиотек NumPy и NetworkX. Для каждого шага роста:

1. Вычисляется матрица Лапласа L графа;
2. Находится её спектр $(\lambda_\alpha, u_\alpha)$ с помощью np.linalg.eigh;
3. Вычисляется псевдообратная матрица L^+ через np.linalg.pinv;
4. По формуле (2) рассчитывается Kf;
5. В зависимости от стратегии выбираются узлы для присоединения нового узла;
6. Граф обновляется (добавляется узел и рёбра).

Начальный граф — модель Эрдёша–Реньи $G(N_0, p)$ с $N_0 = 10$, $p = 0.3$ (для $m = 1$). Количество реализаций — 30, число шагов роста $T = 300$ (для $m = 1$) и $T = 100$ (для $m = 2$).

Реализованы три стратегии для $m = 1$ (рис. 1):

— Случайная: новый узел соединяется со случайным существующим.

— Наиболее центральный: выбирается узел с минимальной суммой эффективных сопротивлений $\sum_j \Omega_{kj}$, то есть максимальная центральность $C(k)$.

— Наименее центральный: выбирается узел с максимальной суммой $\sum_j \Omega_{kj}$

На рис. 1 представлены зависимости индекса Kf/N от числа узлов N в логарифмическом масштабе. Видно, что:

- случайное присоединение даёт рост $Kf/N \sim N\log N$;
- присоединение к наиболее центральному узлу — $Kf/N \sim N$;
- присоединение к наименее центральному узлу — $Kf/N \sim N^2$ [1].

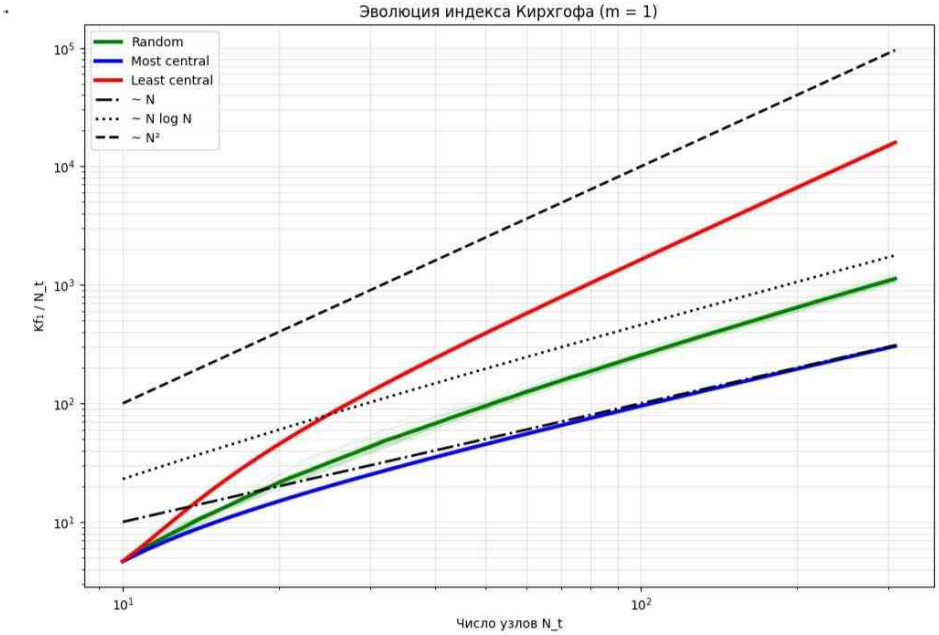


Рис. 1: Эволюция Kf/N для $m = 1$: зелёный — случайный, синий — наиболее центральный, красный — наименее центральный. Пунктирные линии — теоретические масштабы.

При добавлении узла с двумя рёбрами к узлам k и l изменение индекса Кирхгофа определяется величинами [1]:

$$\rho_{kl} = \frac{N}{2}\left(C^{-1}(k) + C^{-1}(l)\right)$$

$$\mu_{kl} = \frac{\omega_{kl}^{-1}}{1 + \omega_{kl}^{-1}\Omega_{kl}}\left(\Omega_{kl}^{(2)} + \frac{N}{2}\Omega_{kl}^2 + \frac{N}{2}\left(C^{-1}(k) - C^{-1}(l)\right)^2\right)$$

где $\omega_{kl}^{-1} = 1/a_{\text{new}} + 1/a_{\text{new}} = 2$ (при единичных весах), $\Omega_{kl}^{(2)} = \sum_{\alpha>1}\left(u_{\alpha,k} - u_{\alpha,l}\right)^2 / \lambda_\alpha^2$
Стратегии выбора пары (k,l):

- случайный выбор,
- минимизация/максимизация ρ_{kl},
- минимизация/максимизация μ_{kl},
- минимизация/максимизация $\rho_{kl} - \mu_{kl}$.

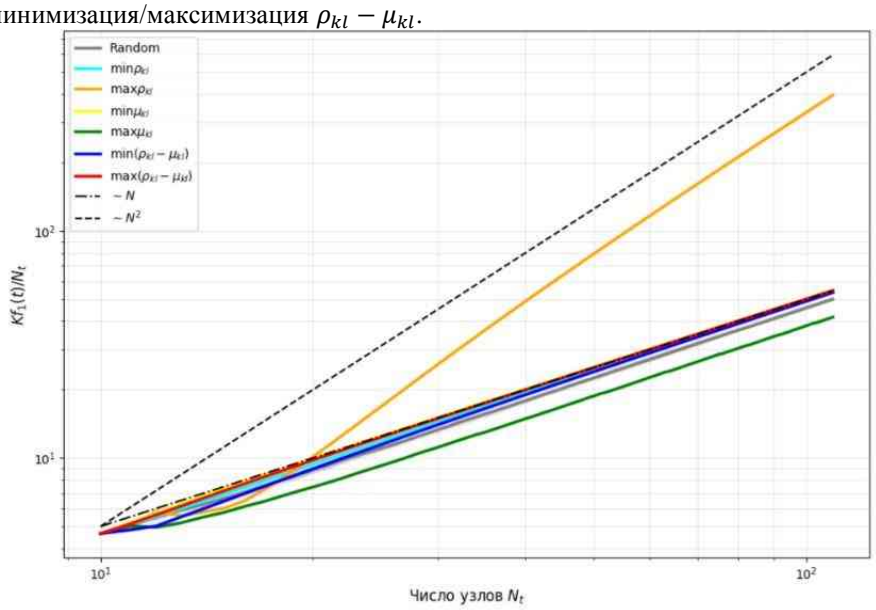


Рис. 2: Эволюция $K\,f/N$ для $m = 2$: различные стратегии.

На рис. 2 показаны результаты для $m = 2$. Случайный выбор и минимизация $\rho_{kl} - \mu_{kl}$ дают линейный рост $K\,f/N \sim N$. Промежуточные стратегии, например, минимизация ρ_{kl} дает значение между этими крайностями.

Заключение

В работе выполнена численная реализация алгоритмов роста сетей с m = 1 и m = 2 согласно теоретической модели [1]. Основные результаты:

1. Для m = 1 подтверждены теоретические ожидания $K\,f/N$: $\sim N$ для наиболее центрального, $\sim NlogN$ для случайного, $\sim N^2$ для наименее центрального.
2. Для m = 2 показано, что случайный выбор и минимизация $\rho_{kl} - \mu_{kl}$.приводят к линейному росту, а ρ_{kl} дает значение между квадратичным и линейным значениями.
3. Реализованные программы позволяют исследовать эволюцию индекса Кирхгофа для произвольных начальных графов и стратегий.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования динамики устойчивости в растущих сетях.

Список литературы:

1. Klein D.J., Randi´c M. Resistance distance // Journal of Mathematical Chemistry. 1993. Vol. 12. P. 81–95.
2. Tyloo M. Evolution of robustness in growing random networks // Entropy. 2023. Vol. 25, no. 9. P. 1340.
3. Tyloo M., Coletta T., Jacquod P. Robustness of synchrony in complex networks and generalized Kirchhoff indices // Physical Review Letters. 2018. Vol. 120, no. 8. P. 084101.

ARXIV RESEARCH ASSISTANT: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АГЕНТ ДЛЯ НАУЧНОГО ПОИСКА

Колпаков М. М.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

В данной работе исследуется применение интеллектуальных агентов на основе больших языковых моделей для автоматизации научного поиска и анализа литературы. Актуальность исследования определяется стремительным ростом числа научных публикаций. Ручной поиск релевантных публикаций, чтение аннотаций и систематизация результатов требуют значительных временных затрат, которые можно существенно сократить за счёт интеллектуальной автоматизации.

Современные задачи анализа научной литературы охватывают несколько взаимосвязанных этапов: формулировка поисковых запросов на языке целевого архива, фильтрация и дедупликация результатов, извлечение ключевых выводов из найденных работ, а также оценка степени изученности выбранной темы. Каждый из этих этапов требует специфического подхода, и последовательная их реализация в виде жёсткого конвейера (pipeline) ограничивает гибкость системы. Например, если поиск по первоначальному запросу возвращает мало результатов, конвейерная архитектура не позволяет изменить стратегию поиска без вмешательства пользователя. Именно поэтому архитектура интеллектуального агента, способного самостоятельно принимать решения о порядке и составе выполняемых действий, представляется более перспективной для решения подобных задач.

В основу разработанной системы положен паттерн ReAct (Reasoning + Acting). Суть паттерна заключается в циклическом чередовании трёх фаз: рассуждение (Thought), в ходе которого модель анализирует текущее состояние и планирует следующее действие; действие (Action) — вызов одного из доступных инструментов с конкретными параметрами; наблюдение (Observation) — получение и анализ результата выполненного действия. Цикл повторяется до тех пор, пока модель не определит задачу как выполненную. Данный подход обеспечивает адаптивность: агент может самостоятельно корректировать стратегию поиска, генерировать дополнительные запросы или пропускать необязательные шаги в зависимости от промежуточных результатов.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный агент позволяет исследователям существенно сократить время на первичный обзор литературы по новой теме. Система применима как инструмент предварительного анализа при подготовке научных работ, грантовых заявок и учебных проектов. В перспективе предполагается внедрение долгосрочной памяти агента для учёта предыдущих сессий, а также переход к мультиагентной архитектуре с распределением ролей между специализированными агентами.

Глава 1. Интеллектуальные агенты в эпоху больших языковых моделей

1.1. Понятие интеллектуального агента

В области искусственного интеллекта под агентом понимается автономная система, которая способна воспринимать окружающий мир, принимает решения и совершает действия для достижения поставленных целей. В отличие от обычной программы, где последовательность операций жёстко задана разработчиком, агент обладает способностью к автономному планированию: он сам определяет, какие шаги предпринять, на основе текущего контекста и результатов предыдущих действий.

Классическая архитектура интеллектуального агента включает три компонента:

1. Восприятие (Perception) — получение информации из среды. В случае LLM-агента это сообщение пользователя и результаты вызова инструментов.
2. Рассуждение (Reasoning) — анализ полученной информации и принятие решения о следующем действии. Эту функцию выполняет большая языковая модель.
3. Действие (Action) — выполнение конкретной операции: вызов API, поиск в базе данных, генерация текста и т.д.

Принципиальное отличие агента от конвейера (pipeline) заключается в наличии обратной связи: после выполнения действия агент получает результат, анализирует его и решает, что делать дальше. Если поиск не дал результатов, агент может изменить стратегию — например, переформулировать запрос или попробовать другие ключевые слова.

1.2. Паттерн ReAct: рассуждение и действие

ReAct-агент – система искусственного интеллекта, которая сочетает в себе два компонента, исследование(Reasoning) и действие(Acting).

Цикл ReAct состоит из трёх повторяющихся фаз:

1. Thought (Мысль) — LLM рассуждает о текущей ситуации.
2. Action (Действие) — на основе рассуждения LLM вызывает конкретный инструмент с определёнными параметрами.

3. Observation (Наблюдение) — агент получает результат вызова инструмента.

После получения наблюдения цикл повторяется: LLM снова рассуждает, выполняет действие и получает результат. Цикл продолжается до тех пор, пока LLM не решит, что задача выполнена, и не даст финальный ответ пользователю.

1.3. Tool-calling: инструменты в руках LLM.

Механизм tool-calling— это техническая основа, которая делает ReAct-агентов возможными. Суть механизма:

1. При инициализации агенту передаётся список доступных инструментов с описаниями: «search_arxiv — поиск статей в arXiv по одному поисковому запросу. Вход: строка запроса на английском. Выход: список найденных статей».
2. LLM получает эти описания как часть контекста и учитывает их при генерации ответа.
3. Вместо текстового ответа LLM может сгенерировать структурированный вызов инструмента.
4. Система-оркестратор перехватывает этот вызов, выполняет соответствующую функцию и возвращает результат обратно LLM.

Важно подчеркнуть, что LLM не выполняет инструменты напрямую - она лишь генерирует намерение вызвать инструмент. Фактическое выполнение происходит в программном коде.

Глава 2. ArXiv как источник научных данных

2.1. Платформа arXiv, API arXiv для программного доступа

arXiv — это открытый электронный архив научных препринтов, основанный в 1991 году физиком Полом Гинспаргом в Лос-Аламосской национальной лаборатории.

К 2026 году arXiv содержит более 2,4 миллиона статей. Ежемесячно публикуется около 18000 новых работ. Платформа является ключевым ресурсом для исследователей: многие важнейшие работы в области машинного обучения и искусственного интеллекта впервые появляются именно на этой платформе.

arXiv предоставляет открытый API, позволяющий программно искать статьи, получать метаданные (название, авторы, аннотация, категории, дата публикации) и скачивать полные тексты в формате PDF.

Поиск осуществляется по текстовым запросам с возможностью фильтрации по категориям, авторам и датам. API поддерживает сортировку результатов по релевантности и по дате. Для работы с API на языке Python существует удобная библиотека arxiv.

Глава 3. Архитектура и реализация агента

3.1. Общая архитектура системы

Архитектура системы включает три уровня:

Уровень 1: Интерфейс пользователя

1. Консольный режим (CLI) — файл main.py
2. Графический интерфейс (GUI) — файл gui.py на базе PyQt6

Уровень 2: Ядро агента:

1. ReAct-агент — файл src/agent.py
2. Набор инструментов — файл src/tools.py
3. Системный промпт, задающий роль и рекомендуемый порядок работы

Уровень 3: Компоненты-исполнители

1. Анализатор запросов — src/query_analyzer.py
2. Поисковик arXiv — src/arxiv_search.py
3. Суммаризатор статей — src/summarizer.py
4. Анализатор уникальности — src/uniqueness.py
5. Генератор отчётов — src/file_generator.py

3.2. Инструменты агента

Агент располагает пятью инструментами:

1. analyze_query (анализ запроса)

Отправляет запрос в LLM, который извлекает ключевые слова на английском, формирует 2-3 поисковых запроса для arXiv и генерирует краткое описание темы на русском.

2. search_arxiv (поиск статей)

Отправляет запрос в API arXiv, получает до 6 статей, дедуплицирует по идентификатору.

Особенность: агент может вызывать этот инструмент многократно с разными запросами, что является ключевым отличием от фиксированного конвейера.

3. summarize_articles (суммаризация)

Для каждой несуммаризированной статьи отправляет аннотацию в LLM, который генерирует структурированное резюме на русском: краткое содержание, ключевые выводы, методы, релевантность.
4. assess_uniqueness (оценка уникальности)
Сравнивает тему пользователя с найденными статьями. Вычисляет процент сходства с каждой статьёй и общий показатель уникальности.
5. generate_report (генерация отчёта)
Собирает всю накопленную информацию (анализ, статьи, резюме) в структурированный текстовый файл и сохраняет его в папку output/.

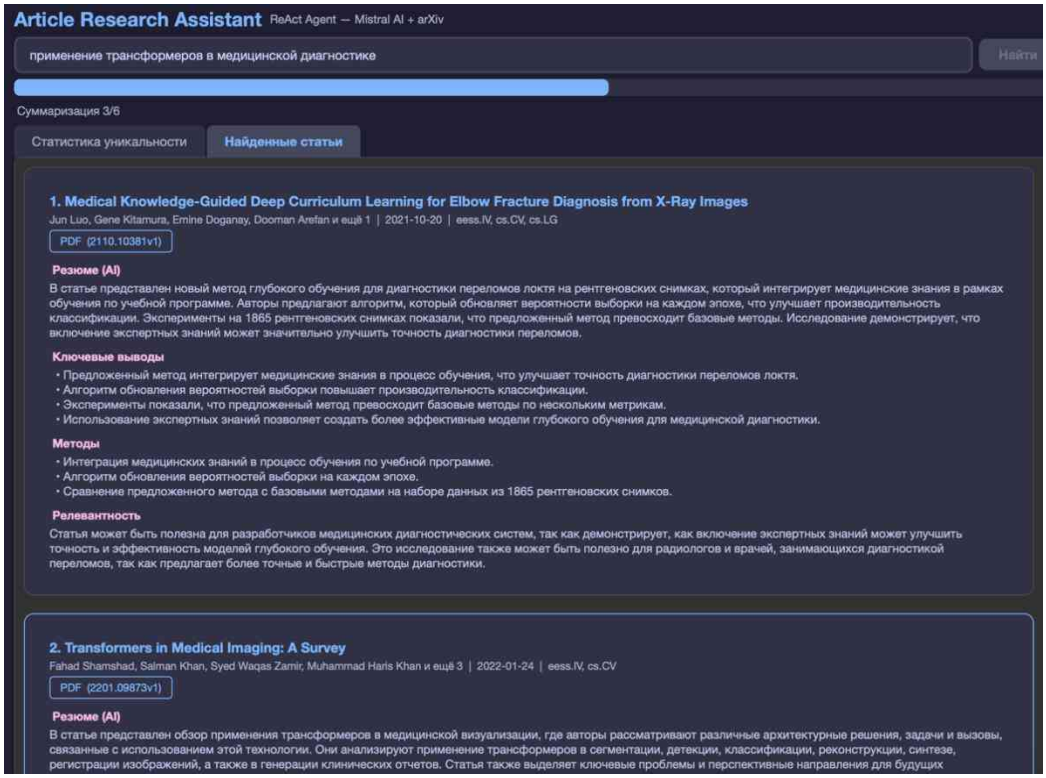
3.3. Стек технологий

Проект использует следующие технологии и библиотеки:
Python 3.13 — основной язык программирования.
LangChain — фреймворк для создания приложений на основе LLM. Предоставляет абстракции для промптов, цепочек (chains) и парсеров вывода.
LangGraph — расширение LangChain для создания агентов на основе графов состояний. Функция create_react_agent создаёт готовый ReAct-агент с циклом «мысль — действие — наблюдение».
Mistral AI — провайдер языковых моделей. Используются две модели: Mistral Large (для агента, tool-calling) и Mistral Small (для суммаризации и анализа запросов).
arxiv (Python-библиотека) — клиент для работы с API arXiv. Позволяет искать статьи и получать метаданные.
scikit-learn — библиотека машинного обучения. Используется модуль TF-IDF vectorizer и cosine similarity для оценки уникальности темы.
PyQt6 — фреймворк для создания графического интерфейса на Python. Используется для десктопного GUI-приложения.
matplotlib — библиотека визуализации. Используется для построения графиков сходства и диаграммы уникальности в GUI.

Глава 4. Результаты работы.

4.1. Пример реального запуска

Для демонстрации работы системы был выполнен запрос по теме «Биоинформатика». Агент выполнил следующую последовательность действий:
1. Проанализировал запрос и извлёк ключевые слова: bioinformatics, computational biology, genomics, proteomics, sequence alignment, biological data analysis, machine learning in bioinformatics.
2. Сформировал 3 поисковых запроса:
    1. bioinformatics computational biology genomics
    2. machine learning applications in bioinformatics
    3. sequence alignment algorithms in computational biology
3. Выполнил поиск по каждому запросу и нашёл 6 уникальных статей, охватывающих: нейронные сети C. elegans, байесовский анализ моделей системной биологии, воспроизводимость в геномике, алгоритмы выравнивания последовательностей, геномные изменения в онкологии.
4. Суммаризировал каждую статью на русском языке, выделив ключевые выводы и методы.
5. Оценил уникальность темы.
6. Сгенерировал отчёт объёмом 211 строк
Общее время выполнения составило около 2 минут, включая все обращения к API Mistral AI и arXiv.
Как выглядит интерфейс в момент поиска и суммаризации статей:



Заключение

В данной работе был спроектирован и реализован Arxiv Research Assistant — интеллектуальный агент для автоматизации научного поиска и анализа литературы. Система использует архитектуру ReAct-агента на базе LangGraph и языковой модели Mistral Large, что обеспечивает адаптивное поведение: агент самостоятельно определяет последовательность действий, может корректировать стратегию поиска и не ограничен фиксированным конвейером.

Список литературы:

1. Курс по LLM и библиотеки langchain:
https://stepik.org/course/215591/syllabus?search=8964987836
2. Статьи хабра по AI-агентам:
https://habr.com/ru/companies/amvera/articles/949376/
https://habr.com/ru/companies/amvera/articles/948000/
https://habr.com/ru/companies/amvera/articles/933460/
3. Документация:
https://docs.python.org/3/index.html

ПОСТРОЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕДУЦИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ В ПРОГРАММНОМ МОДУЛЕ «ЛОГОС ПЛАТФОРМА»

Будникова И.В.
ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

Введение

В состав (ПП) «Логос» входит ПМ «Логос Платформа», предназначенный для обеспечения расчета комплексных мультидисциплинарных задач суперкомпьютерного моделирования, а также для проведения параметрических и оптимизационных исследований [1].

Актуальным направлением является построение и использование редуцированной модели, т.е. упрощенного параметрического представления цифровой модели, описывающего основные зависимости значений выходных параметров от значений варьируемых параметров.

Данные редуцированной модели представляют собой таблицу известных точек исследуемой модели, полученных в результате математического моделирования.

Для расчета каждой точки исследуемой модели необходимо перестроить модель и решить полученную задачу, вычислив значения выходных параметров. Интерполяция точек редуцированной модели позволяет предсказать значения выходных параметров для различных наборов варьируемых параметров без перестроения и расчета модели. Такой подход значительно сокращает количество вычислений и ускоряет процесс математического моделирования.

Примерами применения интерполяции точек редуцированной модели являются:

- определение зависимости выходных параметров от набора варьируемых параметров;
- поиск глобальных и локальных экстремумов модели;
- предсказание значений варьируемых параметров для упрощения сложных и длительных математических расчетов;
- анализ устойчивости модели при малых изменениях ее свойств.

Точность интерполяции зависит от качества используемой редуцированной модели, которое определяется следующими критериями:

- количество точек редуцированной модели;
- степень уменьшения размерности редуцированной модели;
- полнота покрытия всей параметрической области;
- уровень шума и погрешности расчета точек редуцированной модели.

Построение редуцированной модели

В ПМ «Логос Платформа» реализован итерационный подход к построению редуцированных моделей. Каждая итерация состоит из следующих этапов:

- выбираются несколько наборов варьируемых параметров;
- для каждого набора варьируемых параметров вычисляются соответствующие значения выходных данных;
- значения сохраняются в таблице известных точек редуцированной модели;
- выполняется уточнение редуцированной модели, т.е. анализ известных точек и перестроение модели.

Процесс продолжается до достижения заданного качества редуцированной модели или превышения максимального количества итераций.

Одним из главных критериев качества редуцированной модели является полнота покрытия всей параметрической области модели. В ПМ «Логос Платформа» интегрированы специальные методы равномерного разбиения пространства [2], которые обеспечивают наличие известных точек во всей параметрической области уже на первой итерации построения.

Метод латинского гиперкуба разбивает пространство параметров на равные интервалы в каждом измерении, формируя одинаковые и не пересекающиеся гиперкубы, затем выбирает одну точку в каждом гиперкубе.

Последовательности низкой расходимости представляют собой неслучайные последовательности точек, вычисленные по определенным правилам для достижения равномерного распределения в пространстве. В ПМ «Логос Платформа» доступны:

- последовательность Холтона – использует различные простые числа в качестве основания дроби для каждого измерения пространства;
- последовательность Соболя – преобразует точки в бинарные последовательности;
- последовательность пластичных чисел – использует принципы золотого сечения для поиска пластичных чисел и вычисления точек пространства.

На первой итерации построения редуцированной модели анализируются вычисленные начальные точки модели. Далее выбираются новые точек модели, предсказываются значения их выходных параметров, после чего для каждой из этих точек вычисляются истинные значения их выходных параметров.

Дальнейший процесс уточнения модели состоит из следующих этапов:

- анализ соответствия предсказанных и истинных значений, вычисление функции ошибки;
- выбор новых точек модели с учетом ошибки прогноза;
- предсказание значений выходных параметров в новых точках.

Для уточнения модели в ПМ «Логос Платформа» используются методы интерполяции, которые позволяют предсказывать значения выходных параметров, и методы снижения размерности, которые уменьшают количество варьируемых параметров модели.

К методам интерполяции [3] относятся:

− метод обратных взвешенных расстояний – оценивает локальные искривления поверхности по весовым коэффициентам известных точек;

− метод радиальных базисных функций – вычисляет коэффициенты комбинации радиальных базисных функций для минимизации искривления поверхности;

− кригинг – определяет внешний вид поверхности с помощью вариограммы, описывающей вариабельность данных в зависимости от расстояния между точками.

− отбор точек по границам диаграммы Вороного – вычисляет отношение площадей или объемов между фигурами, образованными известными точками и исследуемой точкой.

К методам снижения размерности [3] относятся:

− метод главных компонент – преобразует данные в новое пространство, где первые компоненты объясняют максимальную дисперсию;

− нейросеть вариационный автоэнкодер – применяет вероятностные методы для оценки известных зависимостей и обучается кодировать исходные варьируемые параметры в более короткое скрытое представление (вектор кода).

ПМ «Логос Платформа» предоставляет типовой сценарий построения редуцированных моделей с двумя уровнями вложенности. Верхний уровень реализует итерационное построение модели. Пользователь определяет метод уточнения редуцированной модели и выбора начальных точек, задает конкретные настройки методов и диапазоны значений варьируемых параметров.

Второй уровень реализует шаг параметризации и зависит от решаемой задачи. Примерами операций на шаге параметризации являются:

− перестроение цифровой модели с новыми значениями варьируемых параметров;

− расчет цифровой модели;

− обработка результатов расчета модели;

− вычисление значений выходных параметров.

Результатом построения редуцированной модели в ПМ «Логос Платформа» является архив, содержащий таблицу исследованных точек модели и описание настроек ее построения, таких как метод уточнения и диапазоны варьирования параметров.

Также ПМ «Логос Платформа» предоставляет возможность сохранения построенной редуцированной модели в специальном контейнере, поддерживающем проверку подлинности данных с помощью зашифрованной контрольной суммы.

Использование редуцированной модели

ПМ «Логос Платформа» реализует предсказание значений выходных параметров с помощью модуля интерполяции точек редуцированной модели методом обратных взвешенных расстояний (Inverse distance weighting, IDW). Метод IDW предполагает, что близлежащие точки более похожи, чем удаленные, поэтому их вклад в интерполяцию должен быть пропорционален величине, обратной расстоянию между точками в степени p, определяющей влияние удаленных точек.

Суть метода IDW заключается в вычислении взвешенного среднего значения выходных параметров известных точек, при этом вес каждой известной точки определяется как величина, обратно пропорциональная расстоянию до исследуемой точки в степени p. Полученное значение является предсказанным значением выходного параметра в исследуемой точке.

Для каждого варьируемого параметра вычисляется коэффициент нормирования, проецирующий все значения варьируемого параметра в интервал [0; 1]. Таким образом, вся параметрическая область модели проецируется в гиперкуб со стороной 1. Нормированные значения варьируемых параметров имеют одинаковое влияние на вычисление расстояний.

Интерполяция методом IDW неустойчива к резким изменениям данных и наличию выбросов. Для устранения этой проблемы применяется интерполяция по известным точкам, ближайшим к исследуемой. Поиск соседей реализуется с помощью предварительного построенного бинарного дерева по всем известным точкам модели.

ПМ «Логос Платформа» позволяет использовать редуцированные модели в различных сценариях, в том числе для решения следующих задач:

− поиск глобальных и локальных экстремумов цифровой модели;

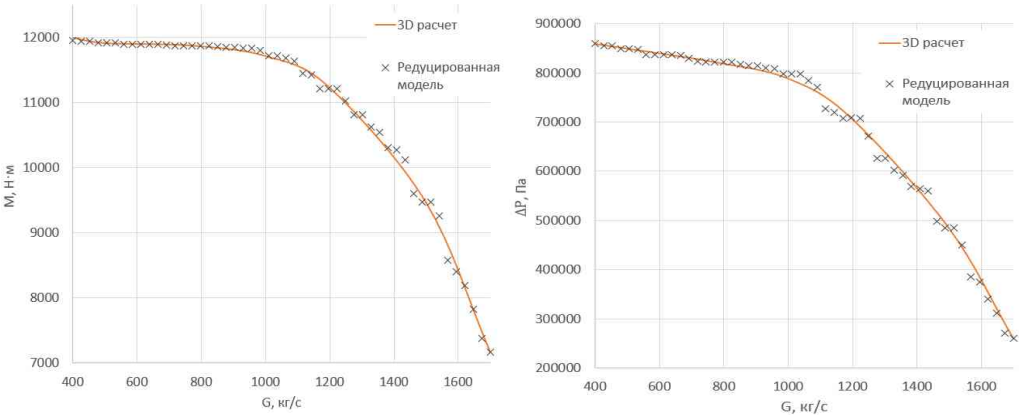
− предсказание значений выходных параметров для разных наборов варьируемых параметров, в том числе определяемых в ходе связанного или сопряженного расчета.

Поиск глобальных и локальных экстремумов обеспечивает метод суперэффективной глобальной оптимизации SEGO, интегрированный в ПМ «Логос Платформа». Этот метод использует построение редуцированной модели методом кригинга или оценки экспертов (MOE), а также интерполяцию ее точек для предсказания областей экстремума.

Примером использования редуцированной модели для предсказания значений является связанный расчет 3D-гидродинамики ПП «Логос» и 1D-модели ПМ «SimInTech» с применением редуцированной модели электронасоса.

На первом этапе была построена редуцированная модель течения в тракте насоса, описывающая зависимость значений момента и перепада полного давления от частоты вращения рабочего колеса и массового расхода воды. Результаты интерполяции точек полученной редуцированной модели хорошо согласуются с результатами трехмерного моделирования в ПП «Логос».

На рис. 1 представлено сравнение результатов трехмерного моделирования и интерполяции точек редуцированной модели для фиксированной частоты вращения.



а) Моменты б) Перепады давления

Рис.4 Сравнение результатов трехмерного моделирования и интерполяции точек редуцированной модели

На втором этапе полученная редуцированная модель электронасоса использовалась для промежуточных вычислений на каждом шаге связанного расчета. Модуль управления связанным расчетом получает значение текущей частоты вращения из ПМ «SimInTech». Для этой частоты и массива фиксированных значений массовых расходов предсказываются значения перепадов давления и передаются в расчетный модуль (РМ) гидродинамики. РМ гидродинамики возвращает значение текущего массового расхода. Модуль управления вновь интерполирует точки редуцированной модели для текущей частоты вращения и массового расхода. Полученное значение момента передается в ПМ «SimInTech». Цикл повторяется на каждом шаге связанного расчета.

Использование редуцированной модели значительно сократило время вычислений в сравнении с расчетом выходных данных электронасоса в РМ гидродинамики.

Заключение

ПМ «Логос Платформа» позволяет:

− проводить построение качественных редуцированных моделей;

− выбирать различные методы задания начальных точек;

− выбирать различные методы уточнения редуцированной модели;

− использовать редуцированные модели в оптимизационных исследованиях;

− использовать редуцированные модели в связанных и сопряженных расчетах;

− снижать временные затраты и сложность вычислений.

Сценарии построения и использования редуцированных моделей в ПМ «Логос Платформа» востребованы и внедрены на предприятия судостроительной отрасли.

Список литературы:
1. Надуев А.Г., Черевань А.Д., Лебедева А.С. Архитектура программного модуля «Логос Платформа», Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов 2022. Вып.4. С. 55-63.
2. Sobol,I.M. (1967), "Distribution of points in a cube and approximate evaluation of integrals". Zh. Vych. Mat. Mat. Fiz. 7: 784–802.
3. G. E. Hinton, R. R. Salakhutdinov. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks. Science 2006. Вып. 313. С. 504–507.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОПОСТИНГА

Дураев Д.С., Холушкин В.С.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров

Каждому пользователю социальных сетей вне зависимости от платформы знакомо изнуряющее чувство, вызываемое необходимостью ежедневно публиковать контент для поддержания активности аудитории. Оно значительно затрудняет ведение блогов и вынуждает тратить часы на рутинные задачи вместо творчества. Студенты нашего института не являются исключениями, поэтому тема автоматизации постинга меня сразу же привлекла.

Предметная область данного доклада — автопостинг — это программный инструмент или сервис, регламентирующий последовательность, время и содержание публикаций (текст, изображения, видео) для аккаунтов в социальных сетях (ВКонтакте, Telegram) на заданный период. Он обеспечивает регулярность присутствия бренда или блогера в информационном поле, настраивается в личном кабинете и учитывает контент-план.

Настраивая автопостинг, приходится сталкиваться с множеством ограничений. Например, к «жёстким» относятся: недопустимость дублирования постов (пример — два разных сообщения выкладываются одновременно на одну стену) и соответствие формата контента (изображение, видео, текст) правилам конкретной соцсети. К «мягким» можно отнести ограничения, направленные на минимизацию простоев (спам-паузы) и обеспечение равномерной вовлечённости аудитории.

Автоматизация данной предметной области поможет минимизировать влияние человеческого фактора и значительно ускорить пересчёт расписания публикаций при изменении контент-стратегии. Использование алгоритмов (жадных, приоритетных или генетических) даёт возможность не просто заполнить свободные временные слоты, а найти наиболее рациональное распределение постов, учитывая интересы всех участников SMM-процесса.

Как было отмечено выше, в качестве вариантов для использования в работе рассматривались следующие алгоритмы, представленные в сравнительной таблице:

Преимущества

- Максимальная скорость работы, простота реализации.
- Учитывает специфику соцсетей, уменьшает количество конфликтов в конце сборки.
- Находит оптимальное решение среди миллионов вариантов, гибко подстраивается под критерии (вовлечённость, охваты).

Недостатки

- Низкое качество: неравномерный интервал, не учитывает «мёртвые часы» аудитории.
- Требует предварительной сортировки данных.
- Сложность разработки, требует больших вычислительных мощностей и времени.

Жадный алгоритм последовательно ставит каждый пост в первый подходящий свободный слот. Это самый быстрый метод, который гарантирует отсутствие наложений, но часто создаёт «паузы» и неудобные разрывы в графике, так как не учитывает часы пиковой активности аудитории.

Приоритетный алгоритм сначала распределяет самые сложные элементы: рекламные интеграции с жёстким временем или посты с конкурсными механиками. Такая стратегия позволяет избежать тупиковых ситуаций в конце сборки, когда для критически важных публикаций не остаётся подходящего времени.

Генетический алгоритм ищет лучшее решение путём имитации эволюции: он создаёт сотни вариантов расписания, «скрещивает» их между собой и проводит случайные мутации.

Метод требует много времени и ресурсов, но позволяет найти наиболее эффективный график среди миллионов возможных комбинаций.

В итоге было принято разработать и жадный, и приоритетный алгоритмы, сравнивая их результаты и отбирая лучший по критериям в процессе. Такое решение было сделано ввиду относительной простоты к разработке и того, что они более щадящие к ресурсам системы.

Для реализации был выбран язык Python [1,2] с использованием асинхронной библиотеки asyncio. В качестве системы хранения данных была выбрана SQLite. Благодаря интеграции через библиотеку sqlite3, удалось реализовать эффективную структуру таблиц с использованием внешних ключей для хранения постов, медиафайлов и настроек групп. Визуализация данных построена на фреймворке Flet (Flutter-подход в Python) с табличными виджетами.

Логика работы с БД вынесена в отдельный класс-менеджер, что позволило изолировать SQL-запросы от интерфейса. Для обеспечения отзывчивости программы процесс генерации расписания публикаций вынесен в отдельные потоки через ThreadPoolExecutor. Обмен данными между потоками реализован на очередях Queue. Дополнительно была реализована система экспорта в формат CSV с использованием встроенного модуля csv, а также система логирования событий для отладки алгоритмов.

Логика каждого алгоритма опиралась на проверку доступности трёх типов ресурсов: аккаунта, временного слота и медиатеки. Для исключения накладок использовались множества set, позволяющие мгновенно определить, занят ли конкретный ресурс в выбранный промежуток времени (слот публикации).

Для выбора наиболее качественного варианта из множества сгенерированных решений была внедрена система оценки через «веса». В функции score_schedule каждому расписанию публикаций начисляются штрафные или бонусные баллы: например, публикация в «мёртвые часы» (3-5 утра) или слишком частые посты (менее 30 минут интервала) снижают итоговый рейтинг. Программа запускает генерацию сразу в нескольких параллельных потоках по 10 расписаний, после чего сравнивает полученные результаты по накопленным баллам и выводит пользователю тот вариант, который набрал максимальный вес. Такой подход позволил автоматизировать выбор наиболее эффективного графика, минимизируя субъективность и человеческий фактор при оценке итогового расписания постов.

Полноценная информационная система для автоматизации автопостинга в социальные сети. Использование языка Python и базы данных SQLite позволило создать надёжное приложение с интуитивно понятным интерфейсом и высокой скоростью обработки данных. Финальный вариант расписания публикаций можно сохранить напрямую в базу данных, либо экспортировать в формате CSV.

Главным результатом стало внедрение многопоточной генерации с системой оценочных весов. Это позволило программе не просто заполнять свободные временные ячейки, а выбирать наиболее рациональный и эффективный вариант графика публикаций из нескольких альтернатив. Созданный инструмент значительно снижает трудозатраты SMM-менеджера и минимизирует риск возникновения ошибок, обусловленных человеческим фактором, что подтверждает практическую ценность проекта.

Список литературы:

1. Свейгарт Э. Фундамент Python [Электронный ресурс]. URL: https://automatetheboringstuff.com/

2. Рамальо Л. Python. К вершинам мастерства [Электронный ресурс]. URL: https://www.oreilly.com/library/view/fluent-python-2nd/9781492056348/

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОМ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДЕ ПРИ П–ОБРАЗНОМ КРАЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Коробов С.А., Чернявский В.П.

Саровский физико-технический институт – филиал НИИЯУ МИФИ, г.Саров

Рассматривается распространение тепла в полубесконечном параллелепипеде

$V:\begin{cases}0\le x\le b\\ 0\le y\le b\\ 0\le z<+\infty\end{cases}$ (осью параллелепипеда является прямая $x=y=\dfrac{b}{2},\ 0\le z<+\infty$).

Температура $u=u(x,y,z,t)$ $((x,y,z)\in V,\ 0\le t<+\infty)$ удовлетворяет уравнению теплопроводности [1,2]

$$\frac{\partial u}{\partial t}=a^2\Delta u, \tag{1}$$

Начальное условие

$$u(x,y,z,0)=\varphi(x,y,z),\quad (x,y,z)\in V. \tag{2}$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{x=0}=0,\quad \frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{x=b}=0,\quad \frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{y=0}=0,\quad \frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{y=b}=0. \tag{3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}\Big|_{z=0}=\sigma(x,y,t),\quad (x,y)\in D:\begin{cases}0\le x\le b\\ 0\le y\le b\\ z=0\end{cases}. \tag{4}$$

Функции $\sigma(x,y,t)$ и $\varphi(x,y,z)$ полагаем интегрируемыми *V* и при всех $t\in[0,+\infty)$ на *D*. Решение начально-краевой задачи (1) - (4) ищем методом разделения переменных как сумму решений вида $X(x)Y(y)Z(z,t).$ В результате разделения для *X*(*x*) и *Y*(*y*) получаем задачи

$$X''+\mu^2X=0,\quad X'(0)=X'(b)=0, \tag{5}$$

$$Y''+\nu^2Y=0,\quad Y'(0)=Y'(b)=0. \tag{6}$$

Ограниченные решения для (5) и (6) возможны только при $\mu=\dfrac{\pi m}{b},\ \nu=\dfrac{\pi n}{b}$, где m и n принимают целые неотрицательные значения. Система функций $1,\cos\dfrac{\pi x}{b},\cos\dfrac{2\pi x}{b},\ldots,$ являющихся решениями задачи (5), ортогональна на отрезке $[0,b]$:

$$d_{mk}=\int_0^b\cos\frac{\pi mx}{b}\cos\frac{\pi kx}{b}\,dx=0\quad\text{при}\quad m\ne k, \tag{7}$$

$$c_m=d_{m\,m}=\frac{b}{2}\quad\text{при}\quad m\ne0\quad\text{и}\quad c_0=b. \tag{8}$$

Решение задачи (1) - (4) находим в виде разложения в двойной ряд Фурье по ортогональной на *D* системе функций $\{\cos\dfrac{\pi mx}{b},\cos\dfrac{\pi ny}{b}\}$

$$u(x,y,z,t)=\sum_{m,n=0}^{\infty}Z_{mn}(z,t)\cos\frac{\pi mx}{b}\cos\frac{\pi ny}{b} \tag{9}$$

где для $Z_{mn}(z,t)$ имеем уравнение

$$\frac{\partial Z_{mn}(z,t)}{\partial t}=a^2\frac{\partial^2Z_{mn}(z,t)}{\partial z^2}-\frac{\pi^2a^2(m^2+n^2)}{b^2}Z_{mn}(z,t). \tag{10}$$

Функция (9) удовлетворяет граничным условиям (3) на боковой поверхности. Для учета условий (2) и (4) разложим функции $\varphi(x,y,z)$ и $\sigma(x,y,t)$ двойные ряды Фурье:

$$\varphi(x,y,z)=\sum_{m,n=0}^{\infty}\varphi_{mn}(z)\cos\frac{\pi mx}{b}\cos\frac{\pi ny}{b},$$

$$\sigma(x,y,t)=\sum_{m,n=0}^{\infty}\sigma_{mn}(t)\cos\frac{\pi mx}{b}\cos\frac{\pi ny}{b},\ \text{где}$$

$$\varphi_{mn}(z)=\frac{1}{c_m c_n}\iint_D\varphi(x,y,z)\cos\frac{\pi mx}{b}\cos\frac{\pi ny}{b}\,dxdy,$$

$$\sigma_{mn}(t)=\frac{1}{c_m c_n}\iint_D\sigma(x,y,t)\cos\frac{\pi mx}{b}\cos\frac{\pi ny}{b}\,dxdy. \qquad (11)$$

Тогда для определения $Z_{mn}(z,t)$ дополнительно к уравнению (10) имеем условия

$$Z_{mn}(z,0)=\varphi_{mn}(z), \qquad (12)$$

$$\frac{\partial Z_{mn}(z,t)}{\partial z}\Big|_{z=0}=\sigma_{mn}(t). \qquad (13)$$

Пусть $F_{mn}(p,t)=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_0^{\infty}Z_{mn}(z,t)\cos pz\,dz$ и $\Phi_{mn}(p)=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_0^{\infty}\varphi_{mn}(z)\cos pz\,dz$ – косинус-преобразования Фурье по переменной *z* соответственно функций $Z_{mn}(z,t)$ и $\varphi_{mn}(z)$. Уравнение (10) в образах Фурье принимает вид:

$$\frac{\partial F_{mn}(p,t)}{\partial t}=-\sqrt{\frac{2}{\pi}}a^2\sigma_{mn}(t)-a^2\left(p^2+\frac{\pi^2(m^2+n^2)}{b^2}\right)F_{mn}(p,t).$$

Решением этого линейного дифференциального уравнения первого порядка с начальным условием $F_{mn}(p,0)=\Phi_{mn}(p)$, вытекающим из (12), является

$$F_{mn}(p,t)=\Phi_{mn}(p)e^{-a^2\left(p^2+\frac{\pi^2(m^2+n^2)}{b^2}\right)t}-a^2\sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_0^t\sigma_{mn}(\tau)e^{-a^2\left(p^2+\frac{\pi^2(m^2+n^2)}{b^2}\right)(t-\tau)}\,d\tau.$$

Величина $Z_{mn}(z,t)$ определяется с помощью обратного косинус-преобразования Фурье

$$Z_{mn}=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_0^{\infty}\Phi_{mn}(p)e^{-a^2\left(p^2+\frac{\pi^2(m^2+n^2)}{b^2}\right)t}\cos pz\,dp-\frac{2a^2}{\pi}\int_0^{\infty}\int_0^t\sigma_{mn}(\tau)e^{-a^2\left(p^2+\frac{\pi^2(m^2+n^2)}{b^2}\right)(t-\tau)}\,d\tau\cos pz\,dp.$$

Меняя порядок интегрирования и учитывая [4,с.494], что $\int_{-\infty}^{+\infty}e^{-\beta\lambda^2}\cos\alpha\lambda\,d\lambda=\sqrt{\frac{\pi}{\beta}}e^{-\frac{\alpha^2}{4\beta}},\ \beta>0,$ в результате преобразований находим

$$Z_{mn}(z,t)=\frac{1}{2a\sqrt{\pi t}}e^{-\frac{\pi^2a^2(m^2+n^2)t}{b^2}}\int_0^{+\infty}(e^{-\frac{(\xi-z)^2}{4a^2t}}+e^{-\frac{(\xi+z)^2}{4a^2t}})\varphi_{mn}(\xi)d\xi-$$

$$-\frac{a}{\sqrt{\pi}}\int_0^t\frac{\sigma_{mn}(\tau)}{\sqrt{t-\tau}}e^{-\frac{z^2}{4a^2(t-\tau)}-\frac{\pi^2a^2(m^2+n^2)}{b^2}(t-\tau)}\,d\tau.$$

Подставляя $Z_{mn}(z,t)$ в (9), имеем в итоге искомое решение задачи (1) - (4)

$$u(x,y,z,t)=u_1(x,y,z,t)+u_2(x,y,z,t). \qquad (14)$$

Здесь $$u_1(x,y,z,t)=\frac{1}{2a\sqrt{\pi t}}\sum_{m,n=0}^{\infty}\alpha_{mn}(z,t)\cos\frac{\pi mx}{b}\cos\frac{\pi ny}{b}e^{-\frac{\pi^2a^2(m^2+n^2)t}{b^2}}, \qquad (15)$$

$$u_2(x,y,z,t)=-\frac{a}{\sqrt{\pi}}\sum_{m,n=0}^{\infty}\Big(\int_0^t\frac{\sigma_{mn}(\tau)}{\sqrt{t-\tau}}e^{-\frac{z^2}{4a^2(t-\tau)}-\frac{\pi^2a^2(m^2+n^2)}{b^2}(t-\tau)}d\tau\Big)\cos\frac{\pi mx}{b}\cos\frac{\pi ny}{b}, \qquad (16)$$

$$\alpha_{mn}(z,t)=\frac{1}{c_mc_n}\int_0^{+\infty}\Big(e^{-\frac{(\xi-z)^2}{4a^2t}}+e^{-\frac{(\xi+z)^2}{4a^2t}}\Big)\Big(\iint_D\varphi(x,y,\xi)\cos\frac{\pi mx}{b}\cos\frac{\pi ny}{b}dxdy\Big)d\xi, \qquad (17)$$

а коэффициенты c_m и $\sigma_{mn}(\tau)$ определены формулами (8) и (11). Схожие результаты, полученные с использованием функций Грина, представлены в [3] , где вместо двойного ряда решение записано произведением однократных рядов (что справедливо при выполнении условия абсолютной сходимости двойного ряда).

В качестве граничного воздействия рассмотрим П-образный тепловой поток, действующий на площадку $D_0:\begin{cases}|x-b/2|<b_0/2\\|y-b/2|<b_0/2\end{cases}$, $(D_0\subset D)$ торцевой поверхности $z=0$ в течение времени *T*:

$$\sigma(x,y,t)=\begin{cases}\mu(t), & если\ (x,y)\in D_0\\ 0, & если\ (x,y)\notin D_0\end{cases}, \qquad (18)$$

$$\mu(t)=\begin{cases}-p, & если\ 0<t\le T\\ 0, & если\ t>T\end{cases}, \qquad (19)$$

а начальную температуру полагаем постоянной: $\varphi(x,y,z)=u_0$. Тогда в (14) $u_1(x,y,z,t)=u_0$ и

$$u(x,y,z,t)=u_0+\sum_{m,n=0}^{\infty}\beta_{mn}W_{mn}(z,t)\cos\frac{2\pi mx}{b}\cos\frac{2\pi ny}{b}, \qquad (20)$$

Здесь $\beta_{00}=\frac{b_0^2}{b^2}$, $\beta_{m0}=\beta_{0m}=\frac{2b_0(-1)^m}{\pi bm}\sin\frac{\pi mb_0}{b}$ при $m\ne0$;

$\beta_{mn}=\frac{4(-1)^{m+n}}{\pi^2mn}\sin\frac{\pi mb_0}{b}\sin\frac{\pi nb_0}{b}$ при $mn\ne0$; и

$W_{mn}(z,t)=-\frac{a}{\sqrt{\pi}}\int_0^t\frac{\mu(\tau)}{\sqrt{t-\tau}}e^{-\frac{z^2}{4a^2(t-\tau)}-\frac{4\pi^2a^2(m^2+n^2)(t-\tau)}{b^2}}d\tau.$ Замена $\frac{z}{2a\sqrt{t-\tau}}=\chi$

преобразует последний интеграл к виду

$$W_{mn}(z,t)=-\frac{z}{\sqrt{\pi}}\int_{\frac{z}{2a\sqrt{t}}}^{+\infty}\mu\left(t-\frac{z^2}{4a^2\chi^2}\right)e^{-\chi^2-\frac{\gamma^2}{\chi^2}}\frac{d\chi}{\chi^2}, \qquad (21)$$

где $\gamma=\gamma_{mn}(z)=\frac{\pi z}{b}\sqrt{m^2+n^2}$. Функцию (19) можно записать с помощью $\eta(t)$ – единичной функции Хевисайда ($\eta(t)=0$ при $t<0$; $\eta(t)=1$ при $t\ge0$): $\mu(t)=-p(\eta(t)-\eta(t-T))$. Тогда,

обозначая $\omega_{mn}(z,t)=W_{mn}(z,t)$ при $0<t\le T$, получим для всех $m,n\ge0$

$$W_{mn}(z,t)=\begin{cases}\omega_{mn}(z,t), & если\ \ 0<t\le T\\ \omega_{mn}(z,t)-\omega_{mn}(z,t-T), & если\ \ t>T\end{cases}. \qquad (22)$$

Интегрирование по частям в (21) отдельно для случаев $m=n=0$ и $m^2+n^2>0$ позволяет выразить величины $\omega_{mn}(z,t)$ через *дополнительную функцию ошибок* [5, p.296] $erfc(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^{+\infty} e^{-\eta^2}d\eta$:

$$W_{00}(z,t)=2pa\sqrt{\frac{t}{\pi}}e^{-\frac{z^2}{4a^2t}}-pz\cdot erfc(\frac{z}{2a\sqrt{t}}),$$

(23)

$$\omega_{mn}(z,t)=\frac{pb}{4\pi\sqrt{m^2+n^2}}(e^{-2\gamma}erfc(\frac{z}{2a\sqrt{t}}-\frac{2\pi a}{b}\sqrt{t(m^2+n^2)})-$$
$$-e^{2\gamma}erfc(\frac{z}{2a\sqrt{t}}+\frac{2\pi a}{b}\sqrt{t(m^2+n^2)})),\quad m^2+n^2>0. \qquad (24)$$

Формулы (20) и (22) - (24) дают аналитическое решение задачи (1) - (4) с граничным условием (18)-(19) и начальным условием $\varphi(x,y,z)=u_0$. Проанализируем зависимость слагаемых решения (20) от времени при фиксированных $x,y,z,$ дифференцируя (21) по *t*.

При $0<t<T$: $\frac{\partial W_{mn}(z,t)}{\partial t}=\frac{pa}{\sqrt{\pi t}}e^{-\frac{z^2}{4a^2t}-\frac{4\pi^2a^2(m^2+n^2)t}{b^2}}>0,$ $W_{mn}(z,t)$ возрастает с ростом *t*.

При $t\ge T$: $\frac{\partial W_{mn}(z,t)}{\partial t}=\frac{2pa^2}{z\sqrt{\pi}}(\lambda_1 e^{-\lambda_1^2-\frac{\gamma^2}{\lambda_1^2}}-\lambda_2 e^{-\lambda_2^2-\frac{\gamma^2}{\lambda_2^2}}),$ где

$\lambda_1=\frac{z}{2a\sqrt{t}}$, $\lambda_2=\frac{z}{2a\sqrt{t-T}}$, $\lambda_2>\lambda_1$. Функция $f(\lambda)=\lambda_1 e^{-\lambda^2-\frac{\gamma^2}{\lambda^2}}$, $\lambda>0$ имеет максимум в точке $\lambda_0=\frac{1}{2}\sqrt{1+\sqrt{1+16\gamma^2}}$. Если $\lambda_0<\lambda_1<\lambda_2$ (т.е. при $t\le t_1=\frac{z^2}{a^2(1+\sqrt{1+16\gamma^2})}$), то $f(\lambda_1)>f(\lambda_2)$, тогда $\frac{\partial W_{mn}(z,t)}{\partial t}>0$ и функция $W_{mn}(z,t)$ возрастает. Если $\lambda_1<\lambda_2\le\lambda_0$ ($t\ge\frac{z^2}{a^2(1+\sqrt{1+16\gamma^2})}+T$), то $f(\lambda_1)<f(\lambda_2),$ $\frac{\partial W_{mn}(z,t)}{\partial t}<0$ и $W_{mn}(z,t)$ убывает.

Отсюда следует, что $t_м$ (точка максимума величины $W_{mn}(z,t)$), принадлежит промежутку $(t_1,\ t_1+T)$. Для нахождения $t_м$ добавим к $\frac{\partial W_{00}(z,t)}{\partial t}=0$ условие, связывающее λ_1 и λ_2:

$$\begin{cases}\lambda_1 e^{-\lambda_1^2-\frac{\gamma^2}{\lambda_1^2}}=\lambda_2 e^{-\lambda_2^2-\frac{\gamma^2}{\lambda_2^2}}\\ \frac{1}{\lambda_1^2}-\frac{1}{\lambda_2^2}=4k\end{cases}, \qquad (25)$$

$k = a^2T / z^2$. Из системы (26) следует: $4k(\lambda_1^2\lambda_2^2 - \gamma^2) = \ln(\lambda_2 / \lambda_1)$. Все решения этого уравнения с помощью замены $\ln\dfrac{\lambda_2}{\lambda_1} = k\theta > 0$ представим в параметрическом виде:

$\lambda_1^2 = \dfrac{1}{2e^{k\theta}}\sqrt{\theta + 4\gamma^2}$,

$\lambda_2^2 = \dfrac{e^{k\theta}}{2}\sqrt{\theta + 4\gamma^2}$. Подстановка во второе уравнение системы даёт

$$\frac{shk\theta}{\sqrt{\theta + 4\gamma^2}} = k. \qquad (26)$$

Функция $h(\theta) = \dfrac{shk\theta}{\sqrt{\theta + 4\gamma^2}}$ при $\theta > 0$ непрерывна, возрастает и $h(0) = 0,\ h(+\infty) = +\infty,$ следовательно, уравнение (26), а вместе с ним и система (27) имеют, и притом единственное решение $\theta = \theta_м$. Значение $\theta_м$ даёт время максимума $t_м = \dfrac{z^2 e^{k\theta_м}}{2a^2\sqrt{\theta_м + 4\gamma^2}}$ величины W_{mn}.

В частном случае $b_0 = b$ формула (14) переходит в решение известной задачи распространения тепла на полубесконечной прямой [2, с.240]. Для геометрического соотношения $b_0 / b = 0.25$ в работе вычислялось распределение температуры в сечении $b \times b$ при $z = 0.25b$ в различные моменты времени. Расчеты проводились в безразмерных единицах $U = \dfrac{u - u_0}{bp}$ и $\dfrac{t}{t_F}$ $(t_F = b^2 / a^2)$, длительность импульса полагалась $T = t_F$. Результаты представлены на рис.1.

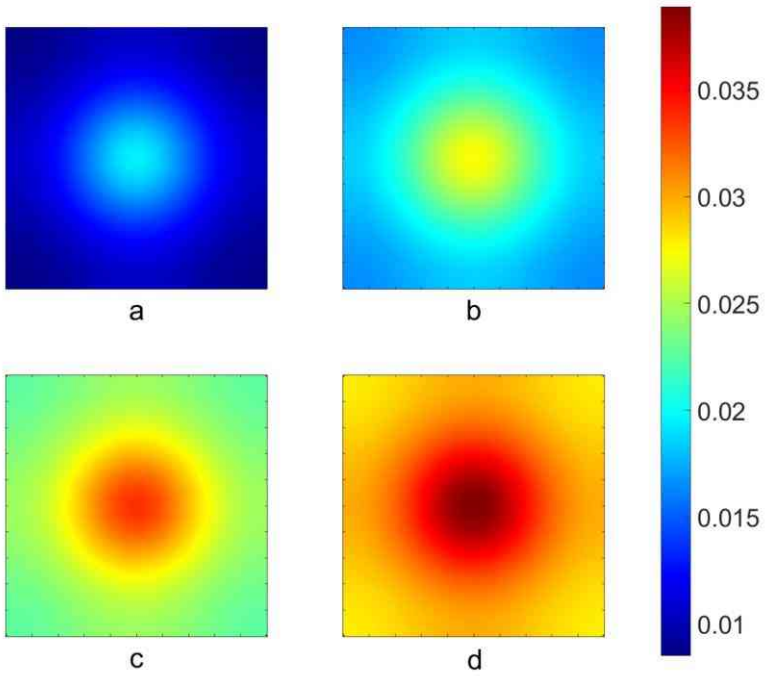


Рисунок 1. Распределение температуры в сечении $z = 0.25b$ при значениях

$$\frac{t}{t_F} = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8: \quad a - 0.2; \quad b - 0.4; \quad c - 0.6; \quad d - 0.8$$

Отметим, что двойной ряд (14) быстро сходится и при вычислениях достаточно было брать $m, n \approx 5-7.$ Варьирование значений T показало, что время наступления максимума температуры в фиксированном сечении $z = const$ ожидаемо возрастает при увеличении длительности импульса.

Список литературы:

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 2004. – 798 с.
2. Свешников А.Г., Боголюбов А.Н., Кравцов В.В. Лекции по математической физике. − М.: Наука, 2004. − 416 с.
3. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
4. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматлит, 1963. – 1100 с.
5. Milton Abramowitz and Irene A. Stegun, eds. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. – N. Y.: Dover, 1972. – 1046 p.

Секция «Математическое моделирование в химии»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВОЙ ХИМИИ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В МОДЕЛИРОВАНИИ ЛИПОФИЛЬНОСТИ АЗОМЕТИНОВ С ДЛИННЫМИ АЛКИЛЬНЫМИ ЗАМЕСТИТЕЛЯМИ

Серов Н.Ю.[1,2], Хаяров Х.Р.[2], Галкина И.В.[2], Григорьев В.А.[2], Гимадиев Т.Р.[1,2]

[1]*Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань*

[2]*Химический институт им. А.М. Бутлерова Казанского федерального университета, г. Казань*

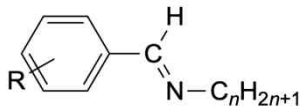
Поиск новых биоактивных соединений является важным вызовом для фармакологии и медицины, в том числе при поиске антибактериальных и антигрибковых средств, особенно с учетом выработки резистентности микроорганизмов к широко используемым лекарственным препаратам. В качестве перспективных биоактивных соединений могут быть рассмотрены азометины (также известные как основания Шиффа), которые могут проявлять хорошую антибактериальную активность [1,2], причем некоторые из них демонстрируют эффективность на уровне стандартных антибиотиков подобных Ципрофлоксацину.

Дополнительный интерес к азометинам со стороны машинного обучения и роботизации лабораторных исследований связан с их достаточно простым синтезом с возможностью получения разнообразных структур путем комбинации различных альдегидов и аминов. Однако экспериментальный синтез и проверка свойств всех возможных соединений в современных реалиях (даже с учетом развития автоматизированных лабораторий) выглядят труднореализуемыми. В этом плане в качестве первичного «фильтра» выступают различные технологии с применением математических моделей, например, молекулярное моделирование и машинное обучение.

Одним из важных параметров при разработке лекарственных соединений [3,4], а также при подборе и оптимизации ряда технологических процессов является липофильность. За количественную характеристику этой величины обычно принимают коэффициент распределения октанол-вода. Липофильность может быть измерена экспериментально напрямую измерением концентраций изучаемого вещества в двух фазах методами встряхивания колбы [5], медленного перемешивания [6] или использованием генераторных колонок [7]. Современным методом измерения липофильности является использование высокоэффективной жидкостной хроматографии [8], однако этот метод не является прямым, поскольку основан на измерении времени удержания и требует калибровки по стандартам с известными значениями липофильности.

Существенным недостатком экспериментальных методов определения липофильности, помимо затраты времени (особенно при работе с медленно растворяющимися веществами), является большая ошибка в определении коэффициента распределения веществ в высокой липофильностью или высокой гидрофильностью. Для веществ, обладающих очень низкой растворимостью в воде или октаноле, надежное применение экспериментальных методов становится и вовсе невозможным. В таких случаях на передний план выходят различные методы моделирования. Так, одним из нередко используемых подходов является определение липофильности из результатов квантово-химических расчетов для исследуемого вещества в воде и октаноле [9]. Однако этот подход становится достаточно затратным с увеличением размера исследуемой молекулы, а также уровня расчета. В качестве более быстрого метода оценки липофильности могут быть применены методы машинного обучения. Одной из моделей по предсказанию коэффициента распределения октанол-вода является GraphormerLogP [10], которую на настоящий момент можно считать наиболее точной и имеющей больший охват химического пространства по сравнению с другими имеющимися в литературе моделями. В настоящей работе именно эта модель применялась в качестве одного из инструментов для оценки липофильности азометинов.

Некоторые из использованных в работе для количественной оценки липофильности азометины были синтезированы и охарактеризованы ранее [11]. Общая структурная формула соединений приведена на рисунке 1. Из-за наличия длинных алкильных заместителей данные соединения практически нерастворимы в воде, что препятствует экспериментальному измерению их липофильности.



R = Cl, Br, NO_2 n = 12, 14, 16, 18

Рис. 1. Структурная формула исследованных азометинов.

Для оценки липофильности данных соединений с помощью машинного обучения структуры были преобразованы в текстовое представление (SMILES) и поданы на вход модели GraphormerLogP [10]. Следует отметить, что получение численных значений коэффициента распределения для всех 60 изомерных структур (Рис. 1) заняло менее минуты. В качестве второго метода определения липофильности были использованы квантово-химические расчеты в программе ORCA [12]. Структуры каждого из соединений были оптимизированы в двух растворителях (вода и октанол). Далее были извлечены энергии Гиббса и на основе их разности для октанола и воды был рассчитан коэффициент распределения. Полный расчет всех структур занял более 200 часов.

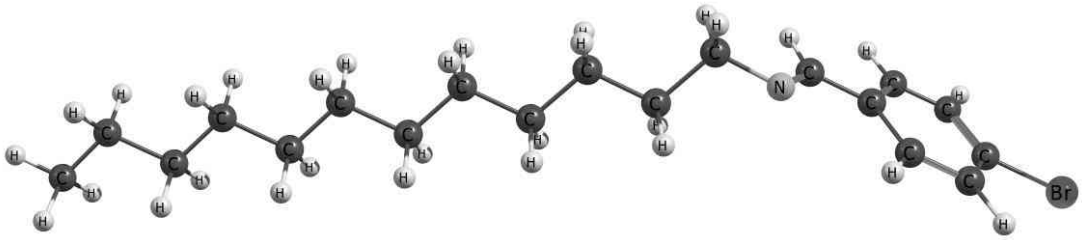


Рис. 2. Оптимизированная структура парабромпроизводного азометина с дуодецильным заместителем в октаноле.

Сопоставление результатов двух методов расчета позволило сделать некоторые выводы. Так, в целом, оба метода дают достаточно схожие результаты с учетом высокой липофильности данных соединений (logP > 6.5); с ростом длины алкильного заместителя наблюдается увеличение значения липофильности.

Одним из различий примененных методов является тот факт, что GraphormerLogP дает большие расхождения для сильно липофильных соединений, что связано с ограниченностью использованного для обучения датасета (logP < 10) [10]. Вторая особенность состоит в следующем – для каждого из производных на рисунке 1 может существовать 5 изомеров (два орто-, два мета- и один пара-), и квантово-химические расчеты в таком случае дают 5 разных (хотя и сравнительно близких) значений липофильности, в то время как использование машинного обучения дает 3 значения (значения для двух орто-изомеров совпадают, как и для мета-). Однако такое различие находит подтверждение как в эксперименте (только один орто- и один мета-изомер выделяются при кристаллизации), а также в расчете барьера вращения для взаимопереходов двух орто- и двух мета-изомеров [11] – барьер вращения не превышает 30 кДж/моль, что позволяет говорить о равновесии между двумя изомерами в растворе.

Таким образом получается, что в данной системе квантовая химия позволяет получить значения липофильности для любой структуры, соответствующей локальному минимуму, в то время как модель машинного обучения дает усредненную картину для легкоизомеризующихся в растворе веществ.

При необходимости оценки параметров большого числа соединений преимущество, бесспорно, за методами машинного обучения. Однако при определении липофильности веществ, сильно выходящих за рамки обучающего датасета, или при необходимости детального анализа влияния различных изомеров или конформеров на определяемый параметр предпочтение следует отдавать методам квантовой химии.

Список литературы:

1. Shanty A.A., Philip J.E., Sneha E.J., Prathapachandra Kurup M.R., Balachandran S., Mohanan P.V. Synthesis, Characterization and Biological Studies of Schiff Bases Derived from Heterocyclic Moiety // Bioorganic Chem. 2017. N. 70. P. 67–73.

2. Iqbal A., Siddiqui H.L., Ashraf C.M., Ahmad M., Weaver G.W. Synthesis, Characterization and Antibacterial Activity of Azomethine Derivatives Derived from 2-Formylphenoxyacetic Acid // Molecules. 2007. N. 12. P. 245–254.
3. Waring M.J. Lipophilicity in Drug Discovery // Expert Opin. Drug Discov. 2010. N. 5. P. 235–248.
4. Arnott J.A., Planey S.L. The Influence of Lipophilicity in Drug Discovery and Design // Expert Opin. Drug Discov. 2012. N. 7. P. 863–875.
5. Ma Y., Chen X., Javeria H., Du Z. High-Throughput Screening of LogD by Using a Sample Pooling Approach Based on the Traditional Shake Flask Method // J. Chromatogr. B. 2023. N. 1227. P. 123804.
6. De Bruijn J., Busser F., Seinen W., Hermens J. Determination of Octanol/Water Partition Coefficients for Hydrophobic Organic Chemicals with the "Slow-Stirring" Method // Environ. Toxicol. Chem. 1989. N. 8. P. 499–512.
7. Woodburn K.B., Doucette W.J., Andren A.W. Generator Column Determination of Octanol/Water Partition Coefficients for Selected Polychlorinated Biphenyl Congeners // Environ. Sci. Technol. 1984. N. 18. P. 457–459.
8. Terada H. Determination of Log P_{oct} by High-Performance Liquid Chromatography, and Its Application in the Study of Quantitative Structure-Activity Relationships // Quant. Struct.-Act. Relatsh. 1986. N. 5. P. 81–88.
9. Roy D., Patel C. Revisiting the Use of Quantum Chemical Calculations in $LogP_{octanol\text{-}water}$ Prediction // Molecules. 2023. N. 28. Art. 801.
10. Grigorev V., Serov N., Gimadiev T., Poyezzhayeva A., Sidorov P. Graph-based transformer to predict the octanol-water partition coefficient // J. Cheminformatics. 2026. In press.
11. Serov N.Yu., Khayarov Kh.R., Galkina I.V., Shulaeva M.P., Grigorev V.A., Gimadiev T.R. Azomethines with Long Alkyl Chains: Synthesis, Characterization, Biological Properties and Computational Lipophilicity Assessment // Chemistry 2026. N. 8. Art. 23.
12. Neese F. Software Update: The ORCA Program System—Version 6.0 // Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Mol. Sci. 2025. N. 15. Art. e70019.

Работа выполнена при поддержке государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

ТЕРМОДИНАМИКА КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ И КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СТРУКТУР КОМПЛЕКСОВ ОКСОВАНАДИЯ(IV) С БИОЛИГАНДАМИ

Уразаева К.В.[1], Серов Н.Ю.[2], Бухаров М.С.[1], Штырлин В.Г.[1]
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет, Химический институт им. А.М. Бутлерова, г.Казань,
[2]Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г.Казань

Координационные соединения оксованадия имеют большой потенциал для лечения различных заболеваний. В небольших терапевтических дозах они способны снижать количество сахара в крови, что делает их перспективными для лечения диабета II типа. Наиболее успешными препаратом на данный момент считается *бис*-(мальтолато)оксованадий(IV) (BMOV) и его аналоги [1]. Кроме того, соединения ванадия с производными 1,10-фенантролина способны проявлять противоопухолевую активность, как, например, препарат Metvan [2].

Таким образом, изучение комплексов оксованадия(IV) с различными биолигандами является актуальной задачей. На текущий момент в литературе имеется достаточно много сведений о гомолигандном комплексообразовании оксованадия в различных валентных состояниях, однако исследования, посвященные гетеролигандным системам, единичны.

Цель данной работы – установить составы, константы устойчивости, спектральные характеристики и параметры лабильности комплексов в тройных системах оксованадий(IV) – ароматический N-донор – аминокислота и в соответствующих бинарных подсистемах, а также с помощью квантово-химических расчетов смоделировать структуры ряда образующихся комплексов и предсказать возможную биологическую активность с помощью молекулярного докинга.

Для достижения поставленной цели были использованы pH-потенциометрия, спектрофотометрия, электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), квантово-химические

расчеты методом DFT. В качестве объектов исследования были выбраны 1,10-фенантролин (Phen), имидазол (Im), а также аминокислота *D*-α-аланин (AlaH).

Для более точного описания гетеролигандных систем необходимо иметь надежные сведения о комплексных формах, присутствующих в растворах гомолигандных систем, а также их константах образования. В связи с этим на первом этапе работы комплексом методов были изучены бинарные системы оксованадий(IV) – *D*-α-аланин и оксованадий(IV) – 1,10-фенантролин/имидазол. В частности, были проведены потенциометрические титрования лигандов, а также спектрофотометрические (СФ) титрования указанных систем. Полученные экспериментальные данные были подвергнуты математическому моделированию с помощью программы STALABS [3], разработанной ранее в нашей научной группе.

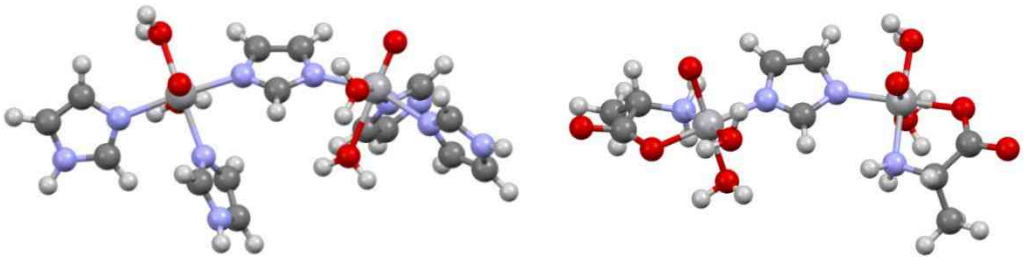
В эксперименте установлено, что при pH > 4 происходит постепенное увеличение оптической плотности растворов в данных системах при стоянии более 2 минут, однако максимум поглощения каждого спектра при этом не смещается. Этот факт объясняется процессами окисления центрального иона металла. Для нивелирования данного эффекта необходимо было исключить долгое стояние растворов на воздухе. Кроме того, во избежание процессов окисления при описании изучаемых систем ограничивались сравнительно узким диапазоном pH, а также проводили постоянное барботирование растворов аргоном.

Рассмотрим подробнее систему оксованадий(IV) – имидазол. По результатам pH-потеницометрического титрования лиганда была установлена его константа протонирования при 25.0 °C на фоне 1.0 M KNO_3: lgβ = 6.95(1), в скобках дано стандартное отклонение в последней значащей цифре. Далее на основании спектрофотометрического титрования в диапазоне pH от 3 до 6 были установлены составы и константы устойчивости комплексных форм, присутствующих в данной системе. Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Логарифмы констант равновесия в системе оксованадий(IV) – имидазол (Im), при 25.0 °C на фоне 1.0 M KNO_3 (в скобках даны стандартные отклонения в последней значащей цифре)

№	Равновесие	lgβ
1	$VO^{2+} + Im \rightleftharpoons VO(Im)^{2+}$	5.15(4)
2	$VO^{2+} + 2Im \rightleftharpoons VO(Im)_2^{2+}$	8.32(4)
3	$2VO^{2+} + 5Im \rightleftharpoons (VO)_2(ImH_{-1})(Im)_4^{3+} + H^+$	17.38(4)

Отметим, что помимо *моно*- и *бис*-формы удалось также зафиксировать наличие биядерного комплекса $(VO)_2(ImH_{-1})(Im)_4^{3+}$ с одной депротонированной молекулой имидазола $(ImH_{-1})^-$, которая выступает в качестве мостика между двумя атомами ванадия (Рис. 1А). Данный факт также согласуется с достаточно высокими значениями молярного коэффициента экстинкции, наблюдаемыми в этой системе.



(А) **(Б)**

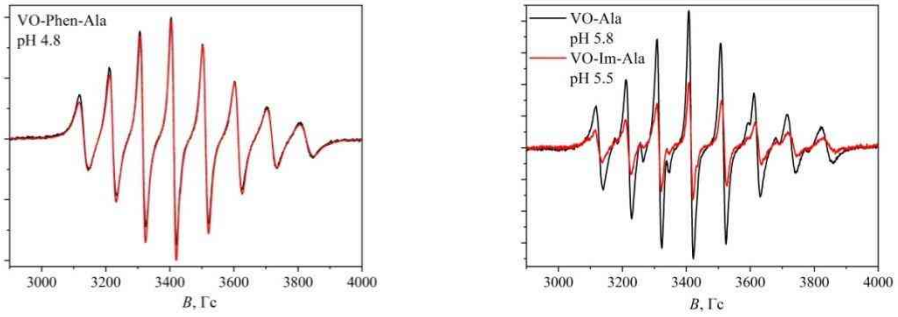
Рис. 1. Структура комплексов $(VO)_2(ImH_{-1})(Im)_4^{3+}$ **(А)** и $(VO)_2(ImH_{-1})(Ala)_2^{+}$ **(Б)**, оптимизированная по программе ORCA [4] методом DFT на уровне B3LYP/def2-TZVPP с коррекцией дисперсии D3 и учетом эффектов растворителя в модели C-PCM.

Спектр ЭПР для системы оксованадий(IV) – имидазол хорошо согласуется с распределением комплексных форм. С помощью обработки экспериментального спектра по

программе EasySpin были установлены следующие параметры спектра ЭПР комплекса $[VO(Im)_2]^{2+}$: g_0 = 1.971, A_0 = 100.0. При этом интенсивность спектра понижена примерно в 10 раз по сравнению со спектрами других комплексов. Этот факт однозначно подтверждает спиновый обмен в комплексе $(VO)_2(ImH_{-1})(Im)_4^{3+}$, при котором наблюдается такое уширение линий спектра ЭПР, что они практически сливаются с базовой линией. Стоить отметить, что именно использование метода ЭПР позволило впервые надежно установить образование биядерного комплекса в данной системе.

На следующем этапе работы была изучена гетеролигандная система оксованадий(IV) – имидазол – *D*-α-аланин. Полученные результаты сравнили с системами оксованадий(IV) – *D*-α-аланин и оксованадий(IV) – 1,10-фенантролин – *D*-α-аланин, представленными ранее в работе [5] с целью определить влияние ароматического N-донора на термодинамику комплексообразования.

По результатам проведенных экспериментов, спектры ЭПР в системах VO(II) – Phen – AlaH (Рис. 2А) и VO(II) – Im – AlaH (Рис. 2Б) резко отличаются между собой, при этом интенсивность поглощения во втором случае примерно на 40% ниже, чем в первом. Этот факт однозначно подтверждает накопление в условиях ЭПР-эксперимента биядерного гетеролигандного комплекса $VO_2(ImH_{-1})(Ala)_2^+$ (Рис. 1Б), который претерпевает спиновый обмен, вызывающий настолько сильное уширение линий спектра ЭПР, что они почти сливаются с базовой линией.



(А) **(Б)**

Рис. 2. Экспериментальный и смоделированный спектры ЭПР в системах оксованадий(IV) – 1,10-фенантролин – *D*-*a*-аланин; $c_{VO(II)}$ = $5.00 \cdot 10^{-3}$ М, $c_{Phen} = 1.023 \cdot 10^{-2}$ М, $c_{Ala} = 1.249 \cdot 10^{-1}$ М **(А)**; оксованадий(IV) – *D*-*a*-аланин и оксованадий(IV) – имидазол – *D*-*α*-аланин; $c_{VO(II)}$ = $5.00 \cdot 10^{-3}$ М, c_{Im} = $1.020 \cdot 10^{-2}$ М, $c_{Ala} = 2.506 \cdot 10^{-1}$ М и $1.251 \cdot 10^{-1}$ М соответственно **(Б)**; T = 25 °C, 1.0 М KNO_3.

На основании спектрофотометрического титрования с помощью математической обработки по программе STALABS было зафиксировано образование только одного гетеролигандного биядерного комплекса $(VO)_2(ImH_{-1})(Ala)_2^+$, который начинает накапливаться после pH 4.0 (Рис. 3). В данной структуре депротонированный имидазол также выступает в виде мостика между двумя атомами металла. Из Таблицы 2 очевидна экстрастабилизация гетеролигандного комплекса $VO(Phen)(Ala)^+$, особенно по параметру lg$X$ (в отсутствие экстрастабилизации lg$X$ < 2), что является результатом *d*-π-взаимодействия с переносом заряда с донорных орбиталей атома кислорода на π-акцепторную систему 1,10-фенантролина. Параметры Δlg$K$ и lg$X$ рассчитывались по следующим формулам:

$$\Delta \lg K = \lg K^{MA}_{MAB} - \lg K^{M}_{MB} = \lg K^{MB}_{MAB} - \lg K^{M}_{MA},$$

$$\lg X = 2\lg\beta_{MAB} - \lg\beta_{MA\,2} - \lg\beta_{MB\,2}$$

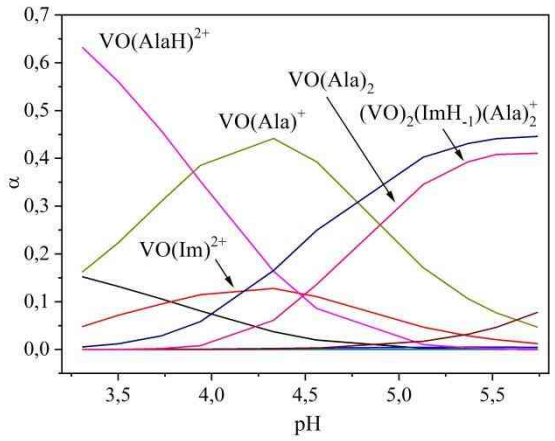


Рис. 3. Диаграмма распределения комплексных форм в системе оксованадий(IV) – имидазол – *D*-α-аланин в условиях СФ-титрования; $c_{VO(II)} = 5.00 \cdot 10^{-3}$ M, $c_{Im} = 1.012 \cdot 10^{-2}$ M, $c_{D\text{-}Ala} = 2.521 \cdot 10^{-1}$ M; $T = 25$ °C, 1.0 M KNO_3.

Таблица 2. Логарифмы констант равновесий в системах оксованадий(IV) – имидазол/1,10-фенантролин – *D*-*a*-аланин при 25.0 °C на фоне 1.0 M KNO_3 (в скобках даны стандартные отклонения в последней значащей цифре)

№	Равновесие	lgβ	Δlg*K*	lg*X*
1	$VO^{2+} + Phen + Ala^- \rightleftharpoons VO(Phen)(Ala)^+$	13.56(5)	0.98	5.35
2	$2VO^{2+} + Im + 2Ala^- \rightleftharpoons (VO)_2(ImH_{-1})(Ala)_2^+ + H^+$	15.76(9)	-	-

Таким образом, в ходе настоящего исследования изучена система оксованадий(IV) – имидазол – *D*-*a*-аланин в сравнении с аналогичной системой с 1,10-фенантролином. Было зафиксировано образование биядерных комплексов с мостиковой молекулой имидазола, которые могут обаладать потенциальной биологической активностью.

Список литературы:

1. Mehdi M. Z. Involvement of insulin-like growth factor type 1 receptor and protein kinase Cδ in bis (maltolato) oxovanadium (IV)-induced phosphorylation of protein kinase B in HepG2 cells / M. Z. Mehdi, G. Vardatsikos, S. K. Pandey, A. K. Srivastava // Biochemistry. – 2006. – V. 45. – No. 38. – C. 11605-11615.

2. Nunes, P. Therapeutic potential of vanadium complexes with 1,10-phenanthroline ligands, *quo vadis?* Fate of complexes in cell media and cancer cells / P. Nunes, I. Correia, I. Cavaco, F. Marques, T. Pinheiro // J. Inorg. Biochem. – 2021. – V. 217. – P. 111350.

3. Крутиков А.А. Патент № 2025612148 «STALABS»: Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.02.2025 / А.А. Крутиков, В.Г. Штырлин, Н.Ю. Серов, М.С. Бухаров // Правообладатель: ФГАОУ ВО «Казанский федеральный университет». — Москва, 2025.

4. Neese F. The ORCA program system // Wiley Interdiscip. Rev.: Comput. Mol. Sci. – 2012. – V. 2, N. 1. – P. 73-78.

5. Уразаева К.В. Термодинамическая устойчивость, лабильность и структура гомо- и гетеролигандных комплексов оксованадия(IV) с ароматическими N-донорами и аминокислотами [Тезисы доклада] / К.В. Уразаева, Н.Ю. Серов, Э.М. Гилязетдинов, М.С. Бухаров, О.В. Кукушкина, В.Г. Штырлин // Математика и математическое моделирование: сб. материалов XVIII Всероссийской молодёжной научно-инновационной школы. Саров, 10–12 апреля 2024 г. Саров: ООО «Интерконтакт», 2024. С. 181–182.

МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ДОКИНГ ГЕТЕРОЛИГАНДНЫХ КОМПЛЕКСОВ МЕДИ(II) С 1,10-ФЕНАНТРОЛИНОМ И ДИТИОКАРБАМАТАМИ

Бухаров М.С., Чжуан Синьхао, Штырлин В.Г.
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Химический институт им. А.М. Бутлерова, Казань

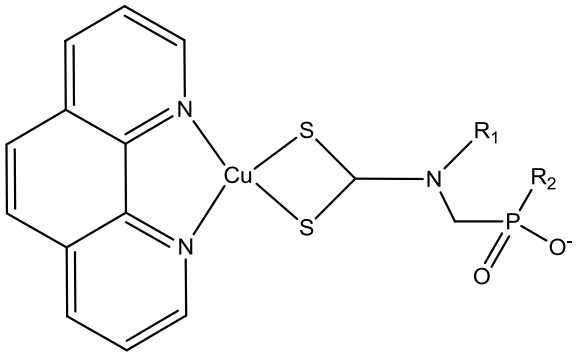
Онкологические заболевания являются одной из ведущих причин смертности населения во всем мире. Несмотря на разработку различных подходов к лечению таких заболеваний, химиотерапия по-прежнему является основным методом. При этом комплексы металлов являются перспективными противоопухолевыми лекарственными средствами. Среди них в последние десятилетия наиболее широко применялись комплексы платины, включая цисплатин и его аналоги. Однако недостаточная эффективность и высокая токсичность этих соединений заставляют искать противораковые средства среди комплексов биометаллов, особенно меди.

Соединения на основе Cu(II) обладают широким спектром биологической активности [1], включая противораковую, противомикробную, противогрибковую и противовирусную. Противораковая активность соединений меди обусловлена способностью ионов Cu^{2+} подвергаться окислительно-восстановительным процессам, подобным реакции Фентона, в результате чего образуются активные формы кислорода (АФК), такие как перекись водорода, гидроксильные и супероксидные радикалы. Образуемые АФК атакуют биомолекулы, приводя к апоптозу раковых клеток.

Наиболее перспективными на сегодняшний день считаются гетеролигандные комплексы меди(II). Например, комплекс нитрат аква-4,7-диметил-1,10-фенантролин-глицинато-меди(II) семейства Casiopeínas® [2,3] проходил фазу III клинических испытаний.

Стоит отметить, что исходя из литературных данных [4] комплексы меди(II), содержащие 1,10-фенантролин или его замещенный аналог в качестве первого лиганда, показывают наилучшую активность. При этом в качестве вторых лигандов обычно рассматриваются соединения с N,O- или O,O-координацией к меди, а использование лигандов с S,S-координацией изучено слабо.

В данной работе методами молекулярного докинга была оценена возможная противоопухолевая активность гетеролигандных комплексов меди(II), содержащих 1,10-фенантролин и новый фосфорилированный дитиокарбамат [5] (PDTC) (Рис. 1).

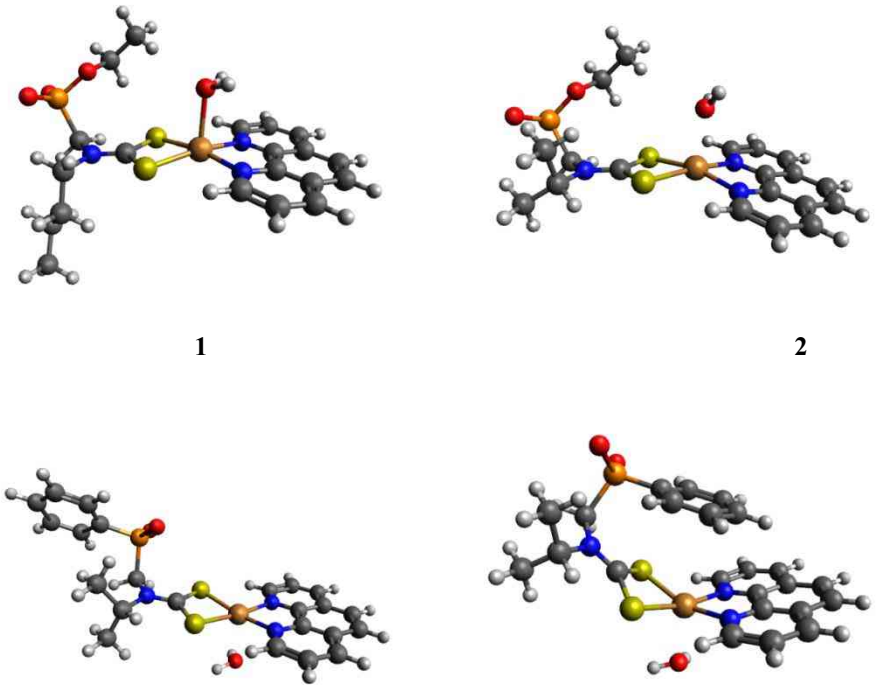


R_1 = Bu, R_2 = OEt
R_1 = *i*-Pr, R_2 = OEt
R_1 = *i*-Pr, R_2 = Ph

Рис. 1. Исследуемые гетеролигандные комплексы меди(II) с 1,10-фенантролином и фосфорилированным дитиокарбаматом.

Одним из предполагаемых механизмов противоопухолевого действия комплексов меди(II) является связывание их с молекулой ДНК, что приводит к ее последующей деградации

под действием АФК и гибели клетки. Поэтому молекула ДНК часто выбирается в качестве мишени для исследований методом молекулярного докинга.



1 **2**

3 **3’**

Рис. 2. Структуры комплексов, оптимизированные в программе ORCA на уровне B3LYP/def2-tzvpd с учетом эффектов среды в модели C-PCM и дисперсионной поправки D3BJ.

На первом этапе с помощью квантово-химических расчетов были оптимизированы структуры исследуемых гетеролигандных комплексов (Рис. 2) в программе ORCA [6].

Стоит отметить, что согласно квантово-химическим расчетам при наличии фенильного фрагмента в дитиокарбамате возможно d-π взаимодействие между ионом меди(II) и ароматическим заместителем. Однако структура координационного полиэдра в этом случае оказывается сильно искаженной. Энергии структур с d-π взаимодействием и без него отличаются на 14 кДж/моль, поэтому в растворе возможно наличие равновесия между ними.

На следующем шаге с помощью программы AutoDock Vina [7,8] были оценены энергии связывания ($E_{св}$) исследуемых комплексов меди(II) с молекулой ДНК. Для этого из базы данных Protein Data Bank [9] была загружена структура макромолекулы (PDB ID: 1BNA). В Таблице 1 приведены значения скоринг-функции, полученные в расчетах методом молекулярного докинга, а на Рис. 3 – примеры расположения комплексов.

Таблица 1. Значения энергий связывания (скоринг-функции Vina) комплексов Cu(Phen)(R_1(R_2)PDTC) с молекулой ДНК

Структура	**1**	**2**	**3**	**3’**
E, ккал/моль	-6.9	-7.1	-8.0	-6.7

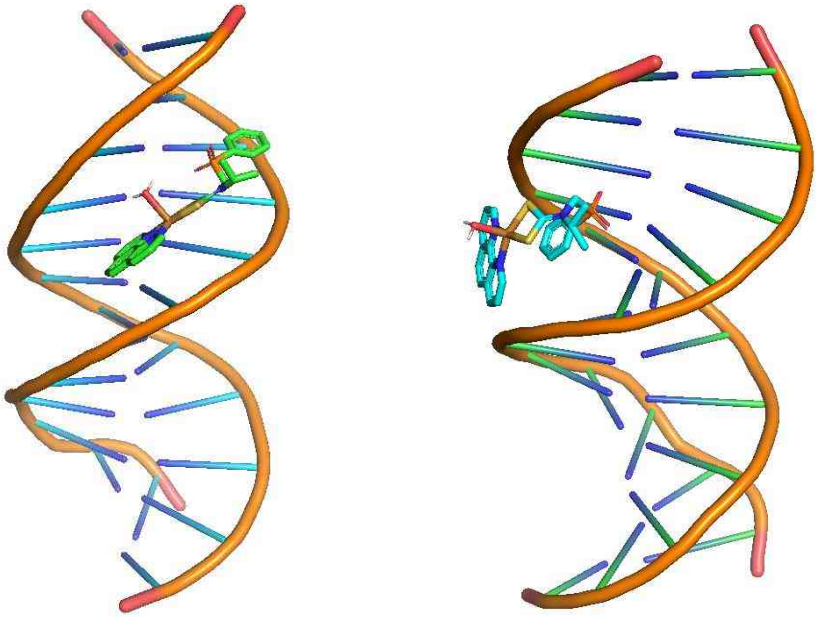


Рис. 3. Расположение комплексов **3** и **3'** в молекуле ДНК по данным молекулярного докинга.

Результаты молекулярного докинга показывают, что все комплексы оказались связанными с малой бороздкой молекулы ДНК (Рис. 3) без интеркалирования между ее основаниями. При этом фенантролин в структуре с комплексом **3'** оказался развернут поперек относительно расположения других комплексов, что обусловило его наихудшее связывание.

Оцененные в расчете энергии связывания исследуемых комплексов с молекулой ДНК имеют достаточно большие по абсолютной величине значения, поэтому можно предполагать их высокую биологическую активность. Полученные значения скоринг-функции сравнимы со значениями, найденными нами для гетеролигандных комплексов меди(II) с 1,10-фенантролином и аминокислотами [10]. Данные комплексы обладают доказанной *in vitro* противоопухолевой активностью на нескольких клеточных культурах со значениями IC_{50} порядка 1-2 мкМ [11].

Таким образом, в данной работе были исследованы гетеролигандные комплексы меди(II) с 1,10-фенантролином и фосфорилированными дитиокарбаматами. Результаты проведенного молекулярного докинга предполагают их высокую противоопухолевую активность. Для проверки полученных результатов в дальнейшем планируется проведение соответствующих биологических испытаний.

Список литературы:

1. Iakovidis, I. Copper and its complexes in medicine: a biochemical approach / I. Iakovidis, I. Delimaris, S. M. Piperakis // Mol. Biol. Int. – 2011. – V. 2011. – Art. 594529.

2. Ruiz-Azuara L. Preparation of new mixed copper aminoacidate complexes from phenanthrolines and their alkyl derivatives to be used as anticancerogenic agents / L. Ruiz-Azuara // Eur. Pat. Appl. – EP 434445, 1991. – 10 pp.

3. Bravo-Gómez, M. E. Antiproliferative activity and QSAR study of copper(II) mixed chelate [Cu(N–N)(acetylacetonato)]NO_3 and [Cu(N–N)(glycinato)]NO_3 complexes, (Casiopeínas®) / M. E. Bravo-Gómez, J. C. García-Ramos, I. Gracia-Mora, L. Ruiz-Azuara // Journal of Inorganic Biochemistry. – 2009. – V. 103, N 2. – P. 299-309.

4. Rogalewicz, B. Recent advances in the discovery of copper(II) complexes as potential anticancer drugs / B. Rogalewicz, A. Czylkowska // European Journal of Medicinal Chemistry. – 2025. – V. 292. – Art. 117702.

5. Мирзаянов, И. И. Синтез и кристаллическая структура дикалиевых солей N-алкил-N-{[О-алкокси(гидрокси)фосфорил]метил}дитиокарбаминовых кислот / И. И. Мирзаянов, А. Р. Гарифзянов, Д. Р. Исламов, В. Г. Штырлин // ЖОХ. - 2020. - Т. 90, Вып. 3. - с. 398-402.
6. Neese, F. Software update: the ORCA program system, version 6.0 / F. Neese // WIRES Comput. Molec. Sci. – 2025. – V. 15, N 1. – Art. e70019.
7. Trott, O. AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading / O. Trott, A. J. Olson. // J. Comput. Chem. – 2010. – V. 31. – P. 455-461.
8. Eberhardt, J. AutoDock Vina 1.2.0: New Docking Methods, Expanded Force Field, and Python Bindings / J. Eberhardt, D. Santos-Martins, A. F. Tillack, S. Forli // J. Chem. Inf. Model. – 2021. – V. 61, N 8. – P. 3891–3898.
9. Berman, H.M. The Protein Data Bank / H.M. Berman, J. Westbrook, Z. Feng, G. Gilliland, T.N. Bhat, H. Weissig, I.N. Shindyalov, P.E. Bourne // Nucleic Acids Research. – 2000. – V. 28. – P. 235-242.
10. Бухаров М.С. Поиск и исследование механизма противоопухолевого действия гетеролигандных комплексов меди(II) по данным молекулярного докинга / М.С. Бухаров, Э.М. Гилязетдинов, Н.Ю. Серов, А. Ахмед Мохамед , В.Г. Штырлин // Сб. материалов XVI Всероссийской молодежной научно-инновационной школы «Математика и математическое моделирование« (Саров, 5-7 апреля 2022 г.). – Саров, Интерконтакт, 2022. – С. 144-145.
11. Ermolaev A.V. Development of comprehensive approaches to characterizing CuII complexes: structures in solution and solid-state, dynamic behavior, and bioactivity / A. V. Ermolaev, V. G. Shtyrlin, A. I. Gizatullin, M. A. Zhernakov, N. Yu. Serov, K. V. Urazaeva, M. S. Bukharov, E. M. Gilyazetdinov, D. R. Islamov, A. A. Rodionov, I. I. Mirzayanov, A. R. Garifzyanov, B. K. Kuramshin // ChemistrySelect. – 2023. – V. 8, N 48. – Art. №e202303333.

Секция «Математическое моделирование в биофизике»

ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ NAC1 НА СТРУКТУРУ БЕЛКОВОЙ ПЛЕНКИ

Леонтьева А.М.[1], Бузоверя М.Э.[1,2]
[1]Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, Саров, [2]ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров

В функциональной морфологии БЖ, как нового направления клинической диагностики, принято считать, что дегидратированная капля БЖ представляет собой стандартный тонкий срез высокоподвижной ткани, структуры которой упорядочиваются и фиксируются в процессе дегидратации. При заболевании состав и взаимосвязь компонентов нарушается, что отражается в конечной структуре БЖ., рисунок которой используется в клинической диагностике, причем на ранней стадии развития патологии, т.е. на доклиническом этапе заболевания [1]. Несмотря на большое количество публикаций по морфологии БЖ и активное использование в клинической диагностике, механизмы структурообразования БЖ являются малоизученными.

Настоящая работа является продолжением работ по исследованию физико-химического механизма структурообразования пленок из водно-белковых растворов биополимерных композиций. В ранее проведенных нами работах на примере дегидратированной пленки сыворочного альбумина человека (САЧ), как физической модели БЖ, были показаны некоторые возможности АСМ в изучении структурной организации пленки [2,3]. В ходе изучения микроструктуры фаций альбумина было установлено, что высшие структуры (надмолекулярный уровень) пленки альбумина более чувствительны к изменению концентрации белка, чем структуры наноуровня. Высказано предположение, что этот структурный эффект связан с разной степенью гидратации белковых молекул водно-белкового матрикса. Так как метод АСМ дает возможность исследовать молекулярный и надмолекулярный уровень БЖ, то он очень интересен не только при изучении механизма структурообразования, но и при поиске молекулярных нарушений, которые имеют место в организме на ранних стадиях развития патологических процессов.

Известно, что добавление к водным растворам веществ, влияющих на активность молекул воды, например, электролитов, способствует частичной дегидратации макромолекул. «Оголенные» участки макромолекул активно взаимодействуют с подобными участками других макромолекул, что способствует гелеобразованию, расслоению, коацервации и др. [4].

Для подтверждения идеи о роли гидратации белковых молекул на морфологию пленок целью настоящей работы являлось исследование влияния водорастворимой соли NaCl в концентрациях выше физиологической (>0.9%NaCl) на структуру альбуминовой пленки методом АСМ. Поэтому задачи данного исследования были следующие:

- получить «патологические» структуры в эксперименте путем добавления 2%,6% и 8% раствора NaCl в 10%водный раствор сыворочного альбумина человека;
- интерпретировать АСМ-изображение, дать словесный портрет;
- определить изменения в белковых структурах на надмолекулярном и молекулярном уровне.

Объект и методы исследования

Исследования проводили на пленках 10%-ного водно-солевого раствора сывороточного альбумина человека (Такеда, Италия), который является модельным аналогом сыворотки крови или слюны. Растворы изготавливали путем добавления к водному раствору 10% альбумина 2%-ый , 6% и 8% раствор NaCl. Далее пробы подготавливали для микроскопии методом открытой дегидратации на стеклянной подложке при комнатных условиях: T=20-24°C; влажность=21-26%.

Структура дегидратированной капли исследовалась на аппаратно-программном комплексе «Морфотест» [5]. АСМ-исследования стекловидной матрицы проводили на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next производства НТ МДТ (г.Зеленоград). Все измерения осуществляли на воздухе при нормальных условиях с использованием зонда марки NSG10/TiN. Частота сканирования 0.6 Гц не менялась при изменении размеров сканов от 0.3 × 0.3 до 30х 30 мкм. Определение параметров микроструктур разного масштабного уровня проводилось с помощью штатного программного обеспечения Image Analysis P9.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены характерные фото микроструктуры пленок САЧ.



Рис.1. Микроструктура дегидратированной капли раствора САЧ: а - раствор 10%САЧ ; б - 10%САЧ+6%NaCl; в - 10%САЧ+2%NaCl

Для пленки водного раствора 10% САЧ структура представляет собой бесструктурную матрицу, разделенную трещинами на отдельности, в центре которой расположена конкреция (рис.1а). Повышение концентрации соли изменяет тип надмолекулярной организации пленки и морфологию структурных элементов: системная организация капли кардинально меняется. Наблюдается загрубление структуры за счет появления крупных образований дендридных и других сложных форм с четкими границами раздела (рис. 1б, в). Можно предположить, что введение соли, меняя качество растворителя [4] , приводит к изменению характера связи между структурными элементами и макромолекулами. Гидрофильная соль оттягивает на себя свободную воду, тем самым меняет структуру водно-белкового матрикса на всех структурных уровнях (рис.2).

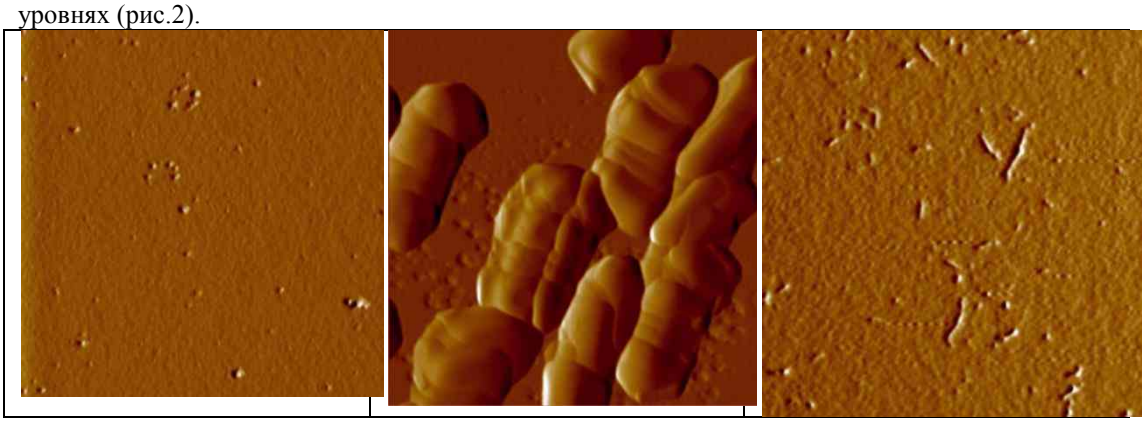


Рис. 2. АСМ - изображение, размер 3х3 мкм: а - 10% САЧ; б -10%+6% NaCl; в - 10%+8% NaCl

Определение параметров микрорельефа пленок показало, что на микроуровне шероховатость поверхности пленки САЧ увеличиваются с повышением концентрации соли в растворе по линейному закону (рис.3а), что хорошо согласуется с изменение морфологии пленки. Для растворов 10% САЧ с добавкой соли характерны крупные удлиненные агрегаты типа пластинчатых и фибриллярных структур вместо тонкодисперсной сетчатой структуры (рис.2б,в).

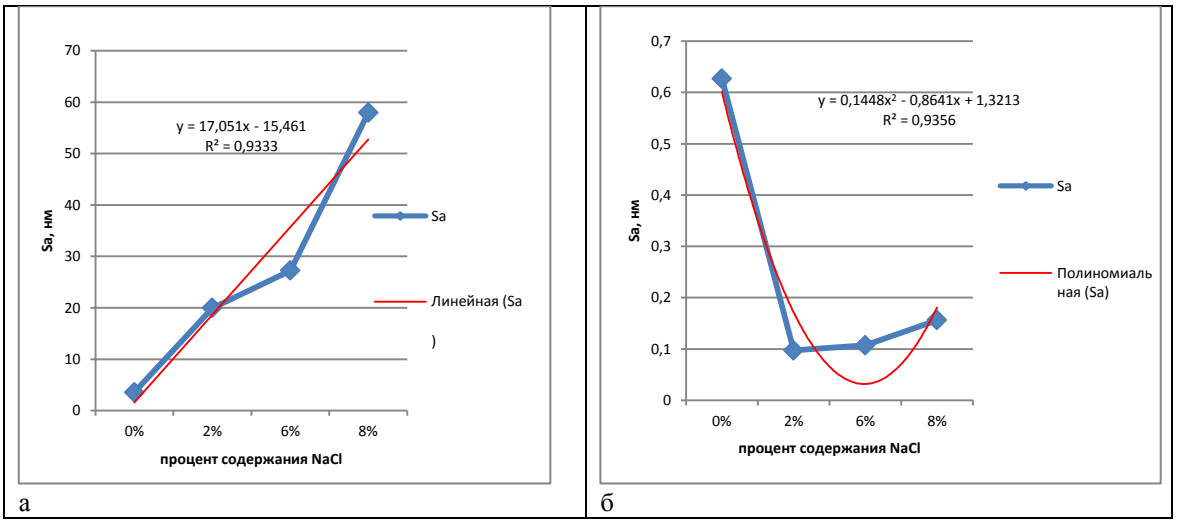


Рис.3- Зависимость шероховатости пленки от концентрации соли:
а – скан 30х30мкм; б - для скана 0.1х0.1мкм.

Обратная картина наблюдается для структур молекулярного уровня. Повышение концентрации соли на этом уровне сопровождает разрыхлением структуры белковой сетки и, как следствие, к падению шероховатости по сравнению с исходной структурой 10% САЧ. (рис.4).

При изменении концентрации соли меняется не только микроструктура капли, а также морфология и характер упаковки кластеров в ассоциатах молекулярного уровня (рис. 4).

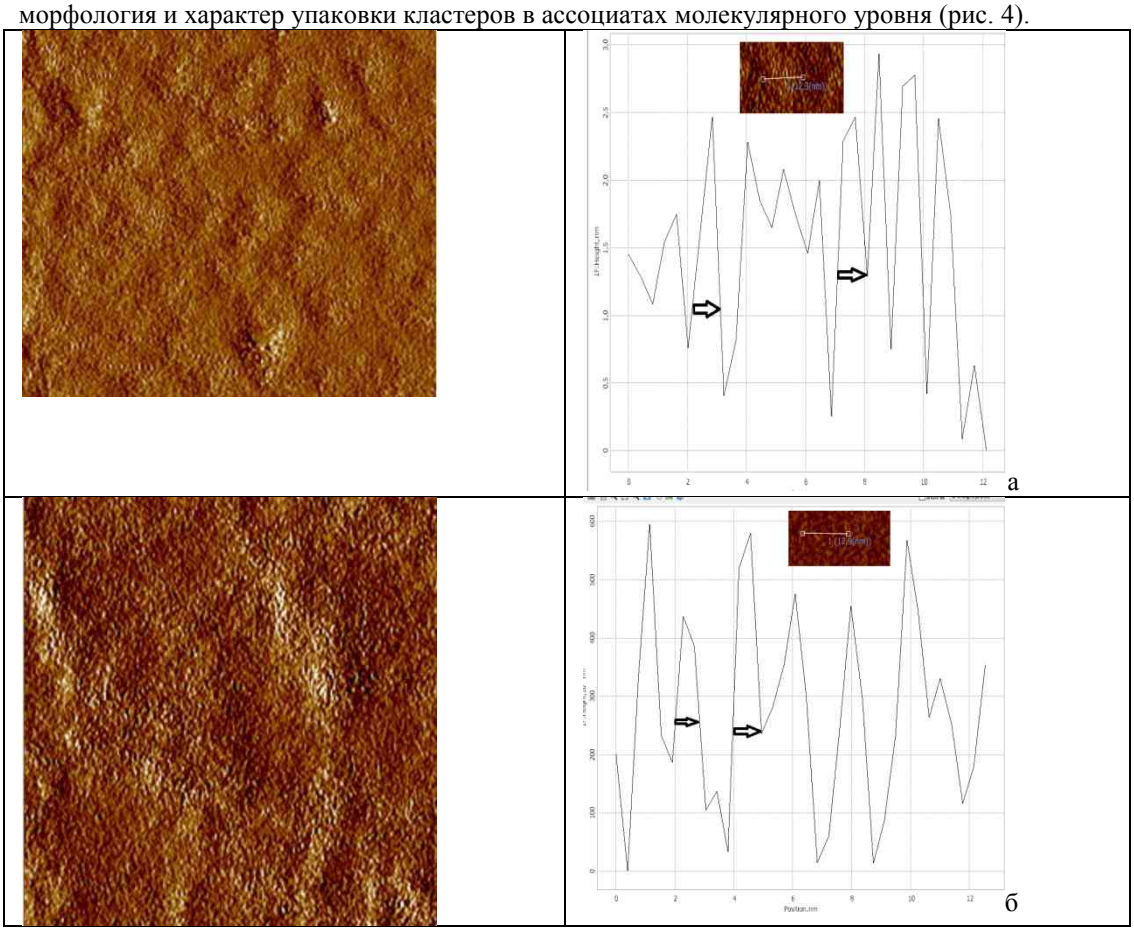


Рис.4- АСМ - изображение белковой сети с профилем сечения, скан 100х100нм: а - 10%САЧ;
б- 10%САЧ+6%NaCl. Стрелки показывают размер первичной глобулы порядка 1-2нм.

Для 10% пленки характерна мелкодисперсной белковая сетка с узлами размером порядка 10 нм (рис.4а). К примеру, для пленки 10% САЧ+6% NaCl упаковка глобул меняется, образуется нерегулярная крупно ячеистая сетка из удлиненных цепочек. Формируется более рыхлая упаковка ассоциатов глобул.

Таким образом, при формировании белковой пленки, на примере модельных растворов САЧ, прослежена связь между концентрацией соли и морфологией пленки на молекулярном и надмолекулярном уровнях. Выявлено, что концентрация соли влияет на характер и тип агрегации белковых структур, плотность их упаковки и морфологию, а также на связь между ассоциатами, тем самым обеспечивая морфологический тип пленки. На всех структурных уровнях САЧ под действием соли происходят изменения. Не меняется только первичный структурный элемент-глобула размером 1-2 нм.

Список литературы:

1. Шабалин В.Н., Шатохигна С.Н. Функциональная морфология неклеточных тканей человека. М.: Триада, 2019,-356с.
2. Бузоверя М.Э., Шишпор И.В., Щербак Ю.П. // ЖТФ. 2018. Т. 88. С. 300.
3. Бузоверя М.Э., Лебедев-Степанов П.В./ /Кристаллография, №1, 2026, с 177-184.
4. Слесарев В.И. Основы химии живого. Учебник для вузов.-СПб: Химиздат, 2001.-784с

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ИК СПЕКТРОВ ХРОМЕНОПИРИДИНОВ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ивлиева (Перетокина) И.В., Мещерякова А.А., Бабков Л.М., Сорокин В.В.
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г.Саратов

Производные хроменопиридина обладают широким спектром биологической активности [1-5], включая противоопухолевую [3], антибактериальную [4,5], противогрибковую [5], являются аденозиновыми рецепторами [6]. Гибридные конденсированные производные хромена представляют большой интерес с точки зрения фундаментальных исследований по органической химии, в частности, на их основе осуществляют синтез различных конденсированных полигетероциклических систем [2, 3, 6]. С учетом сказанного становится актуальным глубокое изучение данных соединений методами квантовой химии и спектроскопии. Установление строения подобных, весьма громоздких систем – задача не из простых. И тем не менее уровень развития современных методов построения структурно-динамических моделей позволяет рассчитать строение больших многоатомных молекул, и их колебательные спектры.

Для дальнейшего изучения новых систем ряда хроменового ряда нами были проведены реакции 2-(2-амино-6-R-3-циано-4H-хромен-4-ил)малононитрила и амида цианоуксусной кислоты и получены хроменопиридины: таутомерная смесь 2-(4-амино-1-циано-5-имино-1,3,5,10b-тетрагидро-2H-хромено[3,4-c]пиридин-2-илиден)-2-цианоацета-мида (***1a***) и 2-циано-2-(4,5-диамино-1-циано-1,10b-дигидро-2H-хромен[3,4-c]пиридин-2-илиден)ацетамида (***1b***) и таутомерная смесь 2-циано-2-(4,5-диамино-9-бром-1-циано-1,10b-дигидро-2H-хромено[3,4-c]пиридин-2-илиден)ацетамида (***2a***) и 2-(5-амино-9-бром-1-циано-4-имино-1,3,4,10b-тетрагидро-2H-хромено[3,4-c]пиридин-2-илиден)-2-цианацетамида (***2b***).

Целью работы было построение структурно-динамических моделей, ***1a*** и ***1b***, ***2a*** и ***2b***, на основе которого следовало интерпретировать измеренные ИК спектры и дать идентификацию компонент полученных смесей.

На Фурье-спектрометре ФСМ 1201 (Россия) записаны ИК спектры смесей ***1a*** и ***1b***, ***2a*** и ***2b*** полученных соединений, запрессованных в таблетках KBr.

Методом теории функционала плотности B3LYP/6-31g(d) [7,8], реализованным в программном пакете GAUSSIAN’03 [9]. Геометрическое строение и значения некоторых длин связей приведены на рисунке 1 и в таблице 1. Они соответствуют общепринятым в структурной химии.

Таблица 1. Вычисленные геометрические параметры молекул ***1a, 1b, 2a, 2b***

1a		***1b***		***2a***		***2b***	
Связь	Длина, Å	Связь	Длина, Å	Связь	Длина, Å	Связь	Длина, Å
C18-N19	1,372	C18-N19	1,375	C18-N19	1,371	C18-N19	1,374

C9-N22	1,382	C9=N22	1,286	C9-N22	1,382	C9=N22	1,286
C10-N17	1,367	C10-N17	1,368	C10-N17	1,367	C10-N17	1,368
C26-N28	1,363	C25-N27	1,363	C26-N28	1,363	C25-N27	1,362
C9=N17	1,310	C9-N17	1,413	C9=N17	1,310	C9-N17	1,412
C35≡N36	1,161	C33≡N34	1,161	C35≡N36	1,161	C33≡N34	1,161
C31≡N32	1,166	C30≡N31	1,166	C31≡N32	1,166	C30≡N31	1,167
C3-O16	1,391	C3-O16	1,389	C3-O16	1,388	C3-O16	1,387
C18-O16	1,353	C18-O16	1,355	C18-O16	1,355	C18-O16	1,357
C26=O27	1,231	C25=O26	1,229	C26=O27	1,231	C25=O26	1,229

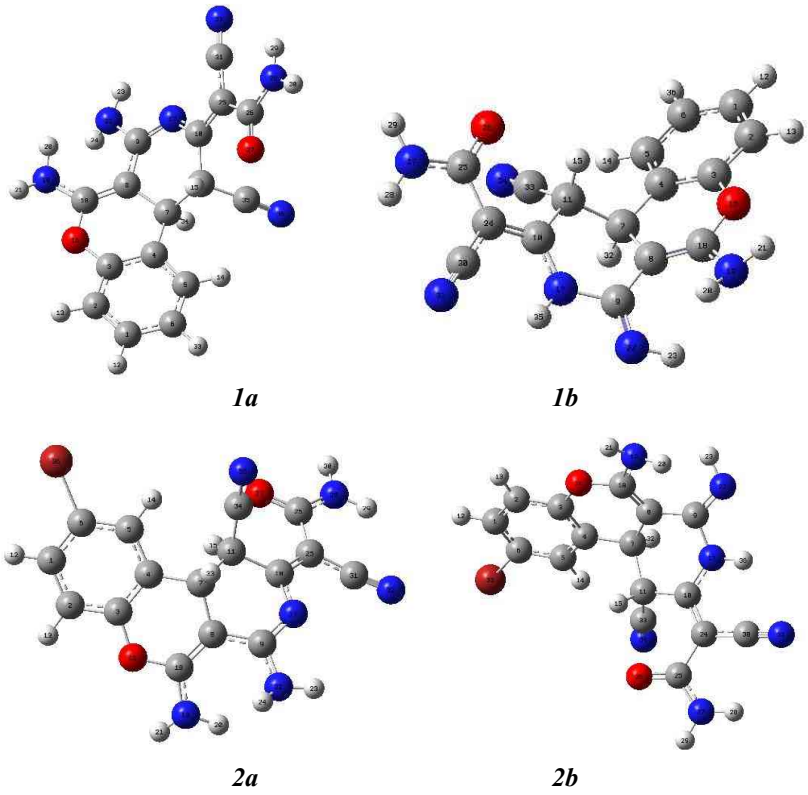


Рис. 1. Геометрическое строение молекул ***1a, 1b, 2a, 2b***

ИК спектры смеси соединений ***1a*** и ***1b***, ***2a*** и ***2b*** рассчитаны в гармоническом приближении, масштабирование частот не проводилось. Измеренные спектры смесей и рассчитанные спектры соединений ***1a*** и ***1b***, ***2a*** и ***2b*** приведены на рисунках 2 и 3.

Из анализа расчетов ИК спектров следует, что колебания исследуемых молекул сильно делокализованы. Тем не менее некоторые характеристические колебания удалось выделить.

В частности, в соединении ***1a*** валентным колебаниям C≡N, ν_{89}, ν_{90}, соответствуют частоты 2319 и 2358 cm^{-1} и интенсивности 66,9 и 10 km/mol соответственно. В соединения ***1b*** этим же колебаниям соответствуют частоты 2310 и 2360 cm^{-1} и интенсивности 68,2 и 6 km/mol.

В соединении ***2a*** валентным колебаниям C≡N, ν_{90}, ν_{91} , соответствуют частоты 2320 и 2359 cm^{-1} и интенсивности 64,7 и 8,7 km/mol, а в соединении ***2b*** частоты 2311 и 2361 cm^{-1} и интенсивности 67,2 и 5,1 km/mol соответственно.

Валентным колебаниям C=N, ν_{87}, ν_{88}, в соединении ***1a*** соответствуют частоты 1710 и 1760 cm^{-1} и интенсивности 515,6 и 360 km/mol, а в соединении ***1b*** - частоты 1732 и 1769 cm^{-1} и интенсивности 461,4 и 387,7 km/mol.

В соединении ***2a*** этим колебаниям, ν_{88}, ν_{89}, соответствуют частоты 1712 и 1761 cm^{-1} и интенсивностями 507,5 и 364,5 km/mol, а в соединении ***2b*** частоты 1734 и 1770 cm^{-1} и интенсивности 448,6 и 393,7 km/mol.

Валентному колебанию C-Br, ν_{61}, соединения ***2a*** соответствует частота 1111 cm^{-1} и интенсивность 24,3 km/mol, а в соединения ***2b*** - частота 1115 cm^{-1} и интенсивность 23,7 км/моль.

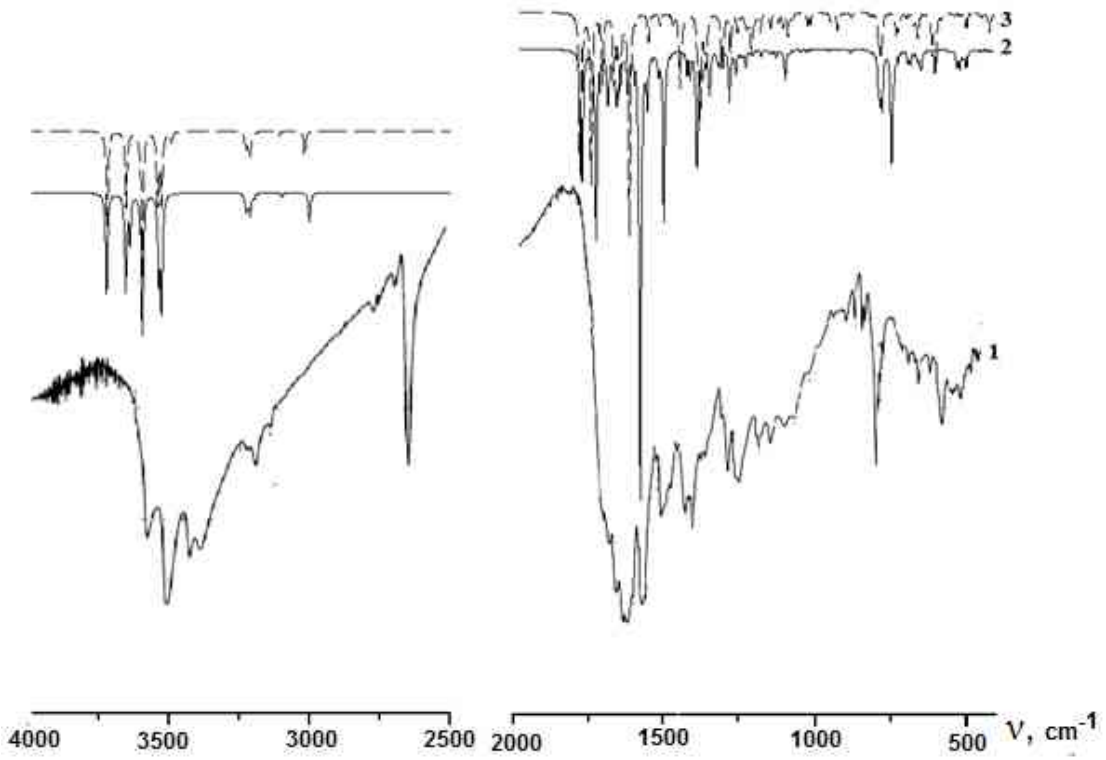


Рис.2. ИК спектры смеси соединений ***1a*** и ***1b*** (эксперимент -1, теория -2, ***1a;*** 3, ***1b***)

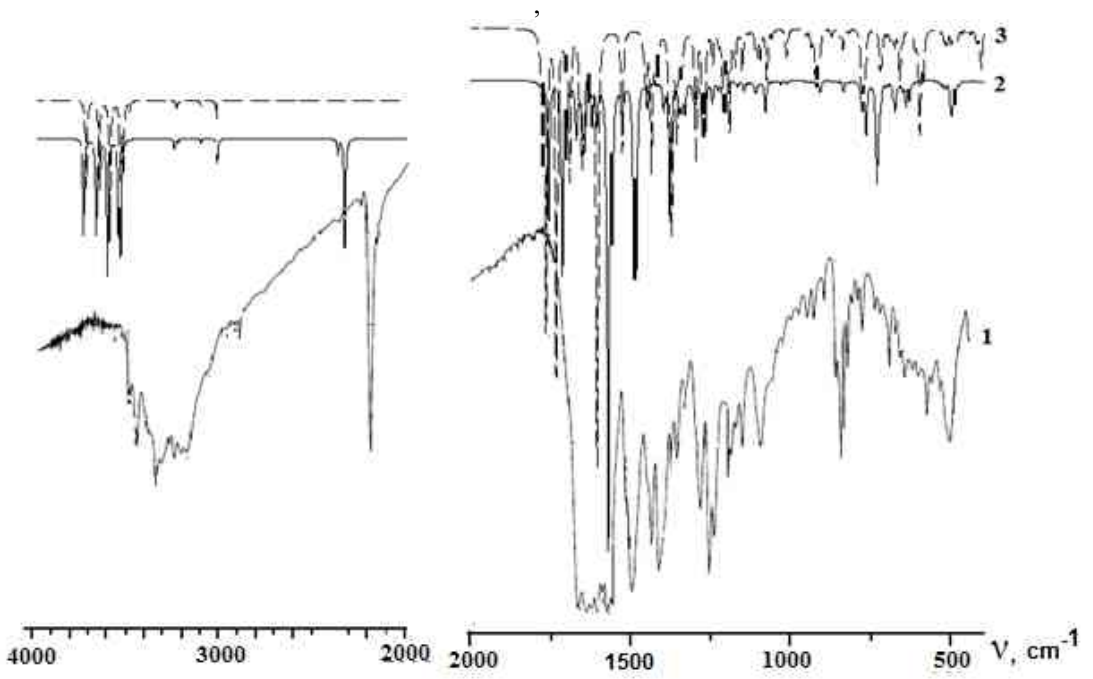


Рис.3. ИК спектры смеси соединений ***2a*** и ***2b*** (эксперимент -1, теория -2, ***2a;*** 3, ***2b***),

Таким образом на основе анализа измеренных ИК спектров смесей соединений ***1a*** и ***1b,***

2a и ***2b*** и результатов моделирования установлена структура соединений ***1a***, ***1b***, ***2a*** и ***2b***, дана интерпретация измеренных спектров, идентифицированы характеристические полосы соединений.

Список литературы:

1. Salehian, F.; Nadri, H.; Jalili-Baleh, L.; Youseftabar-Miri, L.;Bukhari SN, A.; Foroumadi, A.; Küçükkilinç, T.T.; Sharifzadeh, M.;Khoobi, M. A review: Biologically active 3, 4-heterocycle-fusedcoumarins. // Eur. J. Med. Chem., 2021, V. 212, P. 113034.

2. Alshaye, N.A.; Ibrahim, M.A. Synthesis, characterization and biological evaluation of the novel chromenopyridothiazolopyrimidines and chromenopyridopyrimidothiazolo-pyrimidines. //Synth. Commun. 2023, V.53, P.332–344.

3. Raj, V. and Lee, J. 2H/4H-Chromenes—A versatile biologically attractive Scaffold. //Frontiers in Chemistry, 2020, V.8, p.623.

4. Mohamed, Khaled S., and Engy E. Elbialy. Synthesis, characterization and antimicrobial evaluation of some novel chromenopyridine, pyranochromene and 3-hetarylcoumarin derivatives.// Heterocycles, 2020, V.100, No. 7, P. 1035-1047.

5. Fouad S. A. et al. Synthesis of Chromen-2-one, Pyrano [3, 4-c]chromene and Pyridino [3, 4-c] chromene Derivatives as PotentAntimicrobial Agents //Croatica Chemica Acta., 2018., V. 91, №. 1, P. 99-107.

6. Costa M. et al. Synthesis of novel chromene scaffolds for adenosine receptors //Organic & biomolecular chemistry, 2011, V. 9., №. 11., P. 4242-4249.

7. Кон В. Электронная структура вещества – волновые функции и функционалы плотности// УФН. 2002, Т.172, №3. С. 336–348.

8. Попл Дж. А. Квантово – химические модели// УФН. 2002, Т.172, №3. С. 349–356.

9. Frisch J., Trucks G.W., Schlegel H.B. Gaussian03, Revision B.03; Gaussian, Inc., Pittsburgh PA. 2003. 302 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОВАЛЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ТЕТРАПЕПТИДА НАЕЕ С НЕЙТРАЛЬНЫМИ АМИНОКИСЛОТАМИ

Брыксин К.А.[1], Пластун И.Л.[1], Яковлев Р.Ю.[2], Козин С.А.[2]

[1]*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г.Сратов*

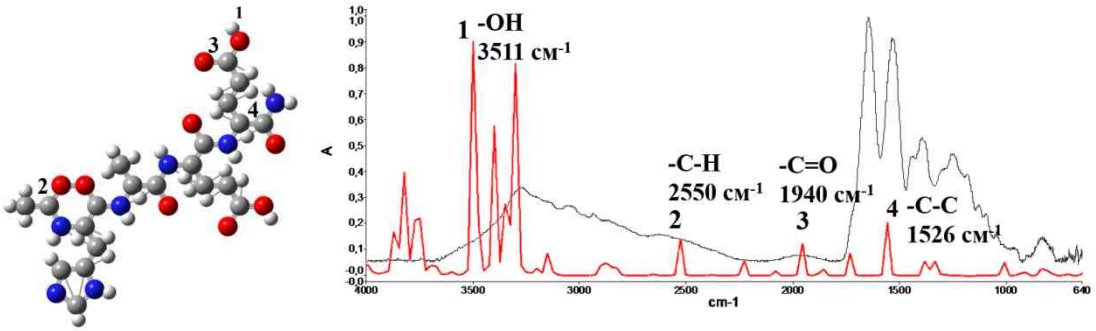
[2]*ООО «Протеоника», г.Москва*

Синтетический тетрапептид Ac-His-Ala-Glu-Glu-NH_2 (НАЕЕ), модифицированный ацетильной группой на N-конце и амидной группой на С-конце, рассматривается как соединение, способное способствовать восстановлению нейрональных функций у человека [1]. Его применение может оказаться перспективным при терапии нейродегенеративных патологий, включая болезнь Альцгеймера и болезнь Паркинсона [2].

Нейродегенеративные заболевания характеризуются наличием общих факторов возникновения и сходных патогенетических механизмов [3]. Это позволяет объединять такие состояния, как болезнь Альцгеймера, сосудистая деменция, нейродегенерация при рассеянном склерозе, болезнь Паркинсона, а также формы болезни Альцгеймера, сопровождающиеся системным воспалением [4]. Воспаление является универсальным патологическим процессом, проявляющимся типичным набором признаков. Современные представления указывают на то, что нейродегенерация зачастую развивается как следствие воспалительных реакций [5].

Биологически активная «развернутая» структура НАЕЕ наиболее эффективно стабилизируется при образовании комплексов с ионами цинка, где металл располагается на границе взаимодействия молекул. В рамках исследования были изучены строение и инфракрасные спектры цинковых комплексов НАЕЕ с аминокислотами. В качестве модельных соединений выбраны серин, глутамин и аспарагин — нейтральные полярные аминокислоты, способные формировать водородные связи в белковых структурах. Также проведено сопоставление теоретически рассчитанных параметров с экспериментальными спектральными данными молекулярных комплексов.

Моделирование межмолекулярного взаимодействия проводилось методами теории функционала плотности [6] с функционалом B3LYP и базисом 6-31G(d) при помощи программного комплекса Gaussian, предварительная оптимизация молекул проводилась в программных комплексах Avogadro и GaussView.
Экспериментальные спектры были сняты с помощью ИК Фурье спектрометра SpectrumTwo с приставкой диффузного отражения DiffusIR в диапазоне 650-4000 $см^{-1}$.



(а) (б)

Рис. 1. Рассчитанная структура (а) и ИК спектры (б) тетрапептида HAEE. Рассчитанный спектр на рисунке (б) обозначен красным цветом, экспериментальный – черным цветом

На первом этапе было проведено исследование структуры и ИК спектра молекулы тетрапептида HAEE, а также сравнение рассчитанного и экспериментального ИК спектра. Структура и спектры молекулы тетрапептида приведены на рисунке 1.

На рисунке 1 видны пики в высокочастотной области спектра, соответствующие колебаниям -OH-группы. Пик, который будет использоваться для присоединения аминокислот, обозначен цифрой 1 и соответствует частоте 3511 $см^{-1}$.

На основе анализа ИК спектра тетрапептида HAEE были выявлены частоты валентных колебаний групп, входящих в его состав. На спектре видны пики полос, соответствующие валентным колебаниям следующих групп: колебания связи -C-C на частоте 1526 $см^{-1}$, колебания связи -C=O на частоте 1940 $см^{-1}$, валентные колебания связи -C-H на частоте 2550 $см^{-1}$, а также колебания связи -OH на частоте 3511 $см^{-1}$.

Следующим этапом было присоединение молекул аминокислот к молекуле тетрапептида HAEE через $ZnSO_4$, а также анализ образовавшихся водородных связей полученных молекулярных комплексов. Рассчитанные структуры и ИК спектры молекулярных комплексов приведены на рисунке 2. На рисунках также приведены частоты основных валентных колебаний молекулярных комплексов.

Также на основании расчетов был проведен анализ образующихся водородных связей для каждого молекулярного комплекса. Сравнительный анализ параметров образующихся водородных связей приведён в таблице 2.

В соответствии с классификацией водородных связей [7], сильным водородным связям соответствует энергия 14,34 – 28,65 kkal/mol, длина связи 1,2-1,5 Å и длина водородного мостика 2,2-2,5 Å, средние связи характеризуются энергией 3,82 – 14,43 kkal/mol, длиной связи 1,5-2,2 Å и длиной водородного мостика – 2,5 – 3,2 Å, слабым связям соответствует энергия менее 2,87 kkal/mol, длина связи 2,2-3,2 Å и длина водородного мостика – 3,2-4,0 Å.

Рассчитанные значения энергии, полученные в программном комплексе Gaussian, с целью верификации результатов сверялись со значениями, полученными по эмпирической формуле Иогансена:

$$-\Delta H=0{,}3\cdot\sqrt{(\Delta\nu-40)}, \quad (1)$$

где -ΔH - приращение энтальпии, являющееся термодинамической мерой энергии связи, Δν - величина частотного сдвига валентных колебаний водородных связей (ΔH, kcal/mol, Δν, cm-1).

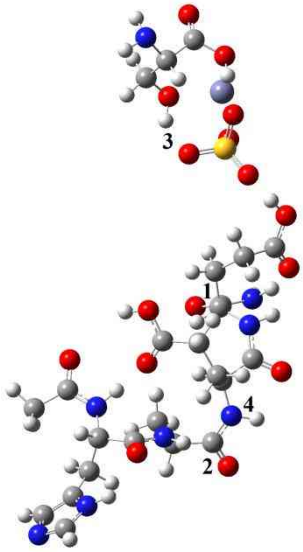
В ходе анализа спектральных характеристик установлено, что для молекулярного комплекса тетрапептида HAEE с серином при участии $ZnSO_4$ длина координационной связи составляет 1,47 Å, протяжённость водородного мостика — 2,44 Å, а энергия взаимодействия — 5,7 ккал/моль. Для аналогичного комплекса с глутамином получены значения: длина связи — 1,6 Å, длина водородной связи — 2,6 Å, энергия — 9,1 ккал/моль.Исследование комплекса

НАЕЕ с аспарагином в присутствии $ZnSO_4$ показало, что длина связи равна 1,46 Å, длина водородного мостика — 2,46 Å, а энергия взаимодействия достигает 7,8 ккал/моль.

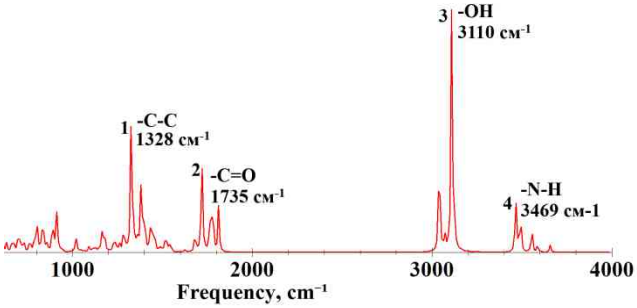
Помимо этого, из рассчитанных ИК спектров молекулярных комплексов видно, что произошел сдвиг частот пиков, а также увеличение интенсивности валентных колебаний групп -C-C, -C=O и -C-H.

Проведённый анализ спектральных данных позволяет установить, что при формировании молекулярных комплексов тетрапептида НАЕЕ с нейтральными аминокислотами между компонентами системы возникают водородные связи средней силы. Наличие таких взаимодействий указывает на достаточно устойчивую, но при этом динамичную структуру комплексов, способную сохранять целостность в физиологических условиях без избыточной жёсткости молекулярной упаковки.

I

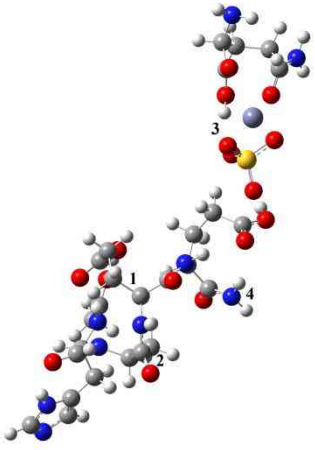


(а)

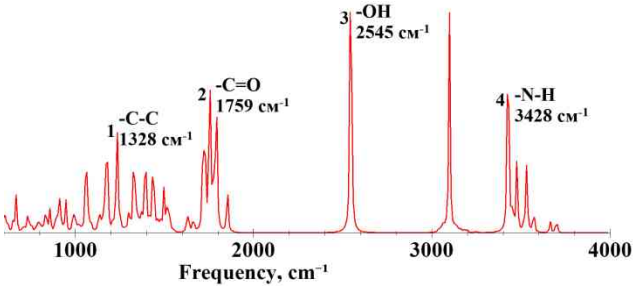


(б)

II

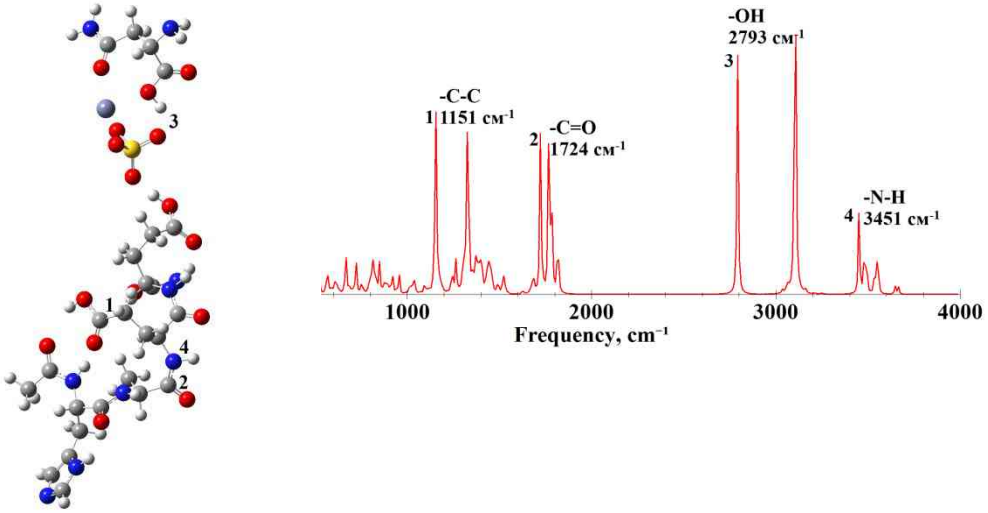


(а)



(б)

III



(а) (б)

Рис. 2. Рассчитанные структуры (а) и ИК спектры (б) молекулярных комплексов молекулярных комплексов тетрапептида НАЕЕ с серином (I), глутамином (II) и аспарагином (III).

Таблица 2. Рассчитанные параметры водородных связей комплексов тетрапептида НАЕЕ с аминокислотами

Номер связи	Тип связи	Длина Н-связи,Å	Длина водородного мостика, Å	Частота, cm^{-1}	Частотный сдвиг Δν, cm^{-1}	Энергия связи -ΔH, kkal/mol	Интенсивность I_{IR}, km/mol
НАЕЕ-$ZnSO_4$-Серин	O-H…O	1,47	2,44	3110	209	5,7	2300
НАЕЕ-$ZnSO_4$-Глутамин	O-H…O	1,6	2,6	2545	966	9,1	2098
НАЕЕ-$ZnSO_4$-Аспарагин	O-H…O	1,46	2,46	2793	718	7,8	1721

Полученные данные указывают на то, что цинксодержащие комплексы тетрапептида НАЕЕ с аминокислотами характеризуются благоприятными структурными и конформационными свойствами и могут рассматриваться в качестве перспективных соединений для создания лекарственных средств. Показано, что в составе таких комплексов тетрапептид НАЕЕ фиксируется в «развёрнутой» конформации, которая считается наиболее оптимальной для реализации его биологической и физиологической активности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 25-22-00258, https://rscf.ru/project/25-22-00258/

Список литературы:

1. Козин С.А., Копылов А.Т., Карпова Е.М., Яковлев Р.Ю. Синтетический тетрапептид НАЕЕ и его производные, предназначенные для восстановления функции нейронов человека : патент RU 2822603 C1 Рос. Федерация, МПК A61K 38/07, A61P 25/00, A61P 43/00. 2023. 28 с.
2. Kozin S.A., Kechko O.I., Adzhubei A.A., Makarov A.A., Mitkevich V.A. Switching on/off amyloid plaque formation in transgenic animal models of Alzheimer's disease // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25, No. 1. P. 72.

3. Литвиненко И.В., Красаков И.В., Бисага Г.Н. и др. Современная концепция патогенеза нейродегенеративных заболеваний и терапевтическая стратегия // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2017. Т. 117, № 6-2. С. 3–10.
4. Williams-Gray C.H., Wijeyekoon R., Yarnall A.J. Et al. Serum immune markers and disease progression in an incident Parkinson's disease cohort (ICICLE-PD) // Movement Disorders. 2016. Vol. 31, No. 7. P. 995–1003.
5. Mostafa A., Jalilvand S., Shoja Z. Et al. Multiple sclerosis-associated retrovirus, Epstein–Barr virus, and vitamin D status in patients with relapsing remitting multiple sclerosis // Journal of Medical Virology. 2017.
6. Попл Дж.А. Квантово-химические модели // Успехи физических наук. 2002. Т. 172, № 3. С. 349–356.
7. Стид Дж. В., Этвуд Дж. Л. Супрамолекулярная химия: в 2 т. М.: Академкнига. 2007 Т. 1. С. 479

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИФФУЗИИ В ДЕНДРИТНОМ ШИПИКЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Вельдин Д.С., Коробов С.А., Лавровская А.Д., Погудалов Н.В., Стадник В.В., Глазунов В.А., Гостева И.В.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г.Саров

Введение

Дендритные шипики представляют собой структуры размеров от 0.1 до 2 мкм на поверхности дендритов нейронов. Они состоят из головки и узкой шейки, связывающей её с основным телом дендрита. Эти образования играют важнейшую роль в механизмах синаптической пластичности, а также в процессах обучения и запоминания информации [1]. При активации синапса ионы кальция проникают внутрь головки и диффундируют по направлению к дендриту через шейку шипика. Процесс диффузии ионов кальция в дендритном шипике является ключевым этапом передачи сигналов между нейронами и регуляции их функциональной активности [2].

Задача моделирования диффузии ионов кальция в дендритном шипике была рассмотрена в работе [3], где авторы использовали ПО COMSOL Multphysics 5.3a для расчетов, но полное аналитическое решение не было построено. В данной работе впервые было получено аналитическое решение для модели, рассмотренной в [3], которое может быть использовано для верификации расчетов с помощью ПО.

Описание модели

Геометрическая структура шипика моделируется как пространство между двумя концентрическими сферами, т.е. сферический слой (см. рис. 1).

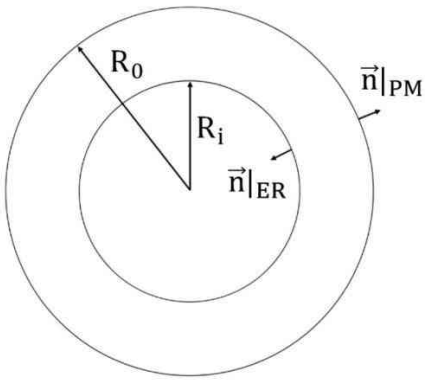


Рис. 1. Геометрическая структура модели.

Математическая постановка задачи для концентрации $C(r,t)$ диффундирующего вещества имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial C}{\partial t}+\dfrac{C}{t}=D\Delta C \\ D\nabla C\vec{n}\,|_{ER}=J_{ER}(t)=\varepsilon J_{PM}(t-t_{ER})H(t-t_{ER}) \\ D\nabla C\vec{n}\,|_{PM}=J_{PM}(t)=\gamma\left(\exp\left(-\dfrac{t}{\alpha}\right)-\exp\left(-\dfrac{t}{\beta}\right)\right) \\ C\,|_{t=0}=0, \qquad r\in\left[R_i,R_0\right] \end{cases}$$

Здесь:

- член $\dfrac{C}{\tau}$ в уравнении диффузии отвечает за химические реакции диффундирующего вещества;
- на границах задаются граничные условия (ГУ) второго рода;
- на внешней границе ГУ представляют собой импульсный поток вещества, направленный во внутреннее пространство;
- на внутренней границе такой же импульс, но с меньшей амплитудой подается только начиная с момента времени $t_{ER}=20\ мс$.

Аналитическое решение

С целью перехода к однородному уравнению выполняется замена $C(r,t)=U(r,t)\exp\left(-\dfrac{t}{\tau}\right)$. Для переменной $U(r,t)$ математическая постановка задачи имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U}{\partial t}=D\Delta U \\ D\nabla U\vec{n}\,|_{ER}=J_{ER}(t)\exp\left(\dfrac{t}{\tau}\right)=J_1 \\ D\nabla U\vec{n}\,|_{PM}=J_{PM}(t)\exp\left(\dfrac{t}{\tau}\right)=J_2 \\ U\,|_{t=0}=0, \ \ \mathrm{r}\in\left[R_{i,}R_0\right] \end{cases}$$

Далее ищем решение в виде $U=V+W$, где W – решение, удовлетворяющее граничным условиям однородного уравнения, а V – решение, удовлетворяющее тривиальным граничным условиям неоднородного уравнения.

Выражение W подбираем из условия $\Delta W=0$. Оно имеет вид:

$$W=\frac{r^6}{6}\cdot\frac{3\left(J_1(t)R_0^2-J_2(t)R_i^2\right)}{\left(R_0^3-R_i^3\right)}-\frac{1}{r}\frac{\left(J_1(t)R_0-J_2(t)R_i\right)R_0^2R_i^2}{\left(R_0^3-R_i^3\right)}.$$

Для V получаем следующую постановку задачи:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V}{\partial t} = D\Delta V + Q \\ D\nabla V\vec{n}\,|_{ER} = 0 \\ D\nabla V\vec{n}\,|_{PM} = 0 \\ V\,|_{t=0} = 0 \\ Q = D\Delta W - \dfrac{\partial W}{\partial t} - \dfrac{1}{\tau}W \end{cases}$$

Для поиска решения V решаем спектральную задачу:

$$\zeta\varphi = \lambda^2\varphi, \text{ где } \zeta = -\Delta$$

$$\begin{cases} -\Delta\varphi = \lambda^2\varphi \\ (\nabla\varphi)\vec{n}\,|_{ER} = 0 \\ (\nabla\varphi)\vec{n}\,|_{PM} = 0 \end{cases}$$

В силу сферической симметрии и однородных граничных условий φ функция зависит только от *r*, следовательно

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dr}\left(r^2\dfrac{d}{dr}\varphi\right) + r^2\lambda^2\varphi = 0 \\ \dfrac{d\varphi}{dr}\,|_{ER} = \dfrac{d\varphi}{dr}\,|_{PM} = 0 \end{cases}$$

Таким образом, получаем задачу Штурма-Лиувилля, решением которой является линейная комбинация сферических функций Бесселя нулевого порядка первого и второго рода, коэффициенты получены из граничных условий:

$$U_n(r) = y'_0(\lambda_n R_0)j_0(\lambda_n r) - j'_0(\lambda_n R_0)y_0(\lambda_n r),$$

где λ_n определяется из характеристического уравнения

$$p(\lambda) = \frac{\partial j_0(R_i\lambda)}{\partial r}\frac{\partial y_0(R_0\lambda)}{\partial r} - \frac{\partial j_0(R_0\lambda)}{\partial r}\frac{\partial y_0(R_i\lambda)}{\partial r} = 0,\ j_0(x) = \frac{\sin x}{x},\ \ y_0(x) = -\frac{\cos x}{x}$$

Система собственных функций данной задачи является полной и ортогональной с весом r^2, поэтому решение задачи для переменной $V(\mathrm{x},\mathrm{t})$ ищем в виде разложения в ряд по собственным функциям:

$$V = \sum_{n=0}^{\infty} f_n(t)U_n(r).$$

Для этого неоднородную часть уравнения $\dfrac{\partial V}{\partial t} = D\Delta V + Q$ разложим в ряд

$$Q = \sum C_n(t)U_n(t), \quad C_n = \frac{\int_{R_i}^{R_0} QU_n(r)r^2dr}{\int_{R_i}^{R_0} U_n^2 r^2 dr}$$

После подстановки в исходное уравнение $\dfrac{\partial V}{\partial t} = D\Delta V + Q$ получаем:

$$\sum_{n=0}^{\infty}\left(f'_n(t)\right)U_n(r) = \sum_{n=0}^{\infty}\left(f_n(t)D\Delta U_n(r) + C_n(t)U_n(r)\right)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty}\left(f'_n(t)+\frac{f_n(t)}{\tau}+\lambda_n^2 D f_n(t)-C_n(t)\right)U_n(r)=0$$

$$f'_n(t)+\left(\frac{1}{\tau}+\lambda_n^2 D\right)f_n(t)=C_n(t)$$

$$f_n(t)=\int_0^t C_n(x)\exp\left(\frac{1}{\tau}+\lambda_n^2 D\right)(x-t)\,dx$$

Таким образом, решение исходной задачи для переменной $C(x,t)$ имеет вид:

$$C(r,t)=\left(\sum_{n=0}^{\infty} f_n(t)U_n(r,t)+W(r,t)\right)\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

На рис. 2 приведен график результата решения задачи для $C(x,t)$ в точке $R_{MID}=\frac{R_0+R_i}{2}$

Подробное описание процесса построения графика см. в работе в этом же сборнике [4].

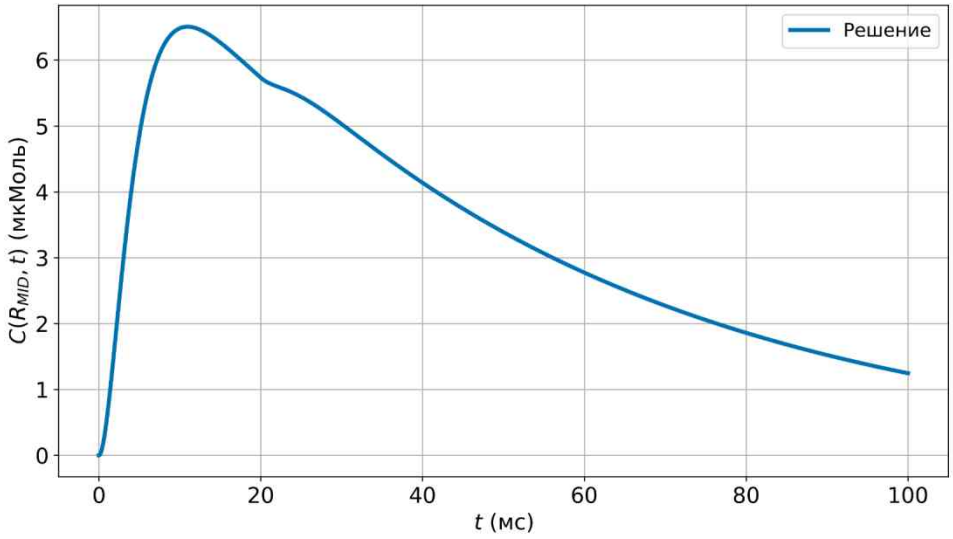


Рис. 2. График аналитического решения $C(R_{MID},t)$, где $R_{MID}=\frac{R_0+R_i}{2}$ для значений параметров из [1]:

$$R_0=0,25\ мкм,\ R_0=0,125\ мкм,\ D=0,1\frac{мкм^2}{мс},\ \alpha=2,5\ мс,\ \beta=2,0\ мс,$$

$$\gamma=-1,14\cdot10^{-6}\ \frac{мкМоль}{мкм^2\cdot мс},\ \varepsilon=0,2,\ \tau=50\ мс,\ t_{ER}=20\ мс.$$

Заключение

В работе проведено подробное аналитическое решение задачи диффузии ионов кальция в дендритном шипике для случая сферического слоя. Для аналитического решения построено графическое представление, которое может быть использовано для верификации численных расчетов в различных программных обеспечениях.

Список литературы:

1. Kholodenko, B. N. Cell-signalling dynamics in time and space // 2006 Nat. Rev. Mol. Cell Biol. 7, 165–176.
2. Bartol, T. M. et al. Computational reconstitution of spine calcium transients from individual proteins // 2015 Front. Synaptic Neurosci. 7, 1–24.

3. Cugno A., Bartol T.M., Sejnowski T.J., Iyengar R., Rangamani P. Geometric principles of second messenger dynamics in dendritic spines // 2019 Scientific Reports, 9, 11676.
4. Погудалов Н.В., Вельдин Д.С., Коробов С.А., Лавровская А.Д., Стадник В.В., Глазунов В.А., Гостева И.В. Применение технологий ИИ в решении задач математической физики // 2026 Сборник докладов XX Всероссийской молодежной научной школы-конференции «Математика и математическое моделирование».

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ В ЦИТОЗОЛЕ ГЕПАТОЦИТОВ

Мартышина А.В., Гостева И.В.
Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г.Саров

Введение

Динамика внутриклеточной концентрации ионов кальция (Ca^{2+}) является универсальным сигнальным механизмом, регулирующим широкий спектр клеточных процессов, включая метаболизм, сокращение, пролиферацию, апоптоз и др. [1, 2]. В частности, важную роль кальциевая сигнализация играет в работе метаболической функции клеток печени гепатоцитов. Например, колебания цитозольного Ca^{2+} в гепатоцитах участвуют в регуляции таких метаболических процессов, как гликогенолиз, глюконеогенез и др. [3].

Известно, что внутриклеточные волны Ca^{2+} обеспечивают более эффективную и координированную передачу сигнала по сравнению с локальными Ca^{2+} событиями [4]. Несмотря на прогресс в понимании генерации и распространения волн Ca^{2+}, вопрос о влиянии внутренней организации клетки на эти процессы остается недостаточно изученным. Взаимное расположение таких органелл, как плазматическая мембрана, эндоплазматический ретикулум (ЭР), являющийся основным депо Ca^{2+}, и митохондрии, участвующие в его буферизации, может оказывать существенное влияние на пространственные и временные характеристики волн Ca^{2+} [5]. Например, непосредственный контакт между ЭР и митохондриями, известный как мембраны, ассоциированные с митохондриями (МАМы), играет важную роль в динамике Ca^{2+} и может модулировать распространение волн Ca^{2+} [6].

Таким образом, настоящее исследование направлено на изучение влияния взаимного расположения органелл внутри гепатоцита на формирование и динамику внутриклеточных волн Ca^{2+} с помощью математического моделирования. Установление этой взаимосвязи позволит понять фундаментальные принципы Ca^{2+} сигнализации в гепатоцитах и может иметь важное значение для разработки терапевтических подходов к лечению заболеваний печени, связанных с нарушениями клеточного метаболизма и сигнализации.

Описание модели

В качестве модели узкого пространства цитозоля между органеллами в гепатоците нами был взят отрезок, концевые точки которого воспроизводят плазматическую мембрану (PM), эндоплазматический ретикулум (ER) и митохондрии (Mit) (см. левую часть рис. 1). Для удобства точки, соответствующие органеллам, выделены красным и вынесены отдельно за отрезок. В этих точках решается система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), взятая из работы [7], а на самом отрезке задается система уравнений диффузии. Вертикальной стрелкой обозначено направление оси OX, содержащей моделируемый отрезок.

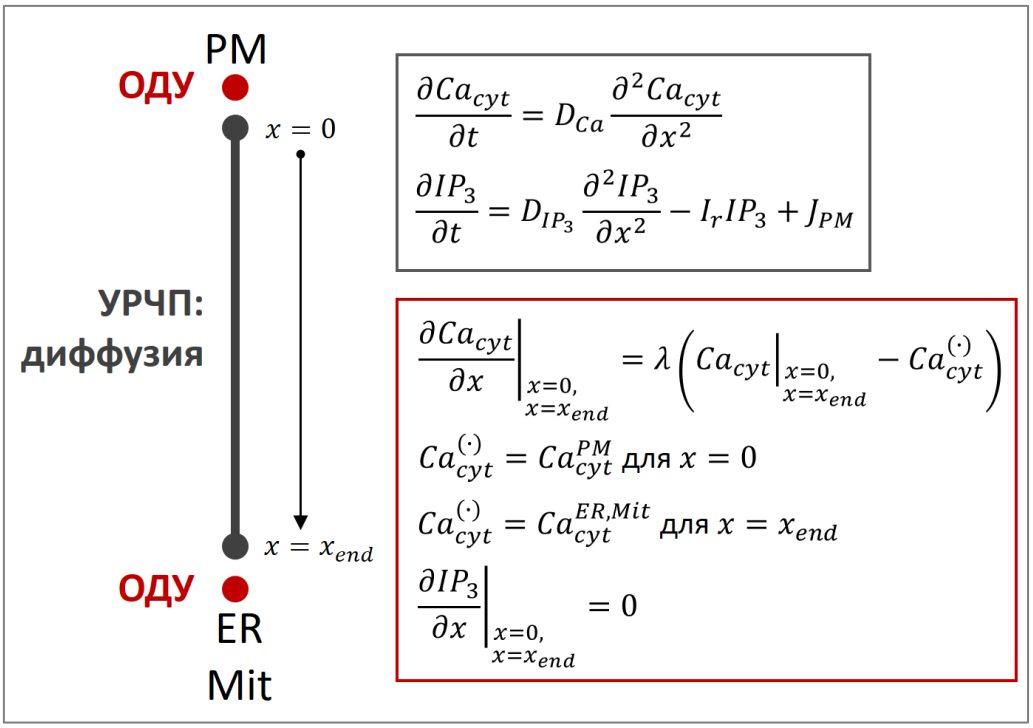


Рис. 1. Геометрия и уравнения модели.

На рис. 1 справа представлены уравнения УРЧП-составляющей модели (уравнения в частных производных). В нее входит система двух уравнений диффузии: для концентраций цитозольного кальция Ca_{cyt} и вторичного мессенджера IP_3. Для IP_3 в уравнении учтен молекулярный распад, ограничивающий бесконечный рост стимула и гарантирующий возвращение системы в состояние покоя. Также здесь введен источник J_{PM}, отвечающий за синтез IP_3 из мембранных фосфолипидов. Отметим, что в данной работе мы исследуем поведение системы при двух видах источника J_{PM}: а) однократный стимул клетки в начальный момент времени и еще один после возвращения системы в состояние покоя; б) длительное воздействие на клетку в определенные временные периоды (состояние голодания). Для каждого из уравнений диффузии на концах отрезка записаны граничные условия (ГУ). Для IP_3 взяты ГУ непроницаемости, что обусловлено биологическим смыслом (молекулы IP_3 не могут проходить сквозь мембраны). Для Ca_{cyt}, наоборот, записываются ГУ третьего рода, поскольку поток Ca^{2+} происходит по градиенту концентраций (из области с высокой концентрацией в область с низкой). Здесь важно обратить внимание на то, что результат работы ОДУ-составляющей модели – изменение во времени концентрации цитозольного кальция вблизи органелл $Ca_{cyt}^{(\cdot)}$ – используется для записи граничных условий для Ca_{cyt}. Таким образом, через граничные условия объединены УРЧП- и ОДУ-составляющие модели.

Обработка результатов моделирования

В результате работы модели мы получаем интересующую нас зависимость концентрации цитозольного кальция от координаты и времени $Ca_{cyt}(x,t)$, а также все остальные переменные модели. На рис. 2 представлено пространственно-временное распределение $Ca_{cyt}(x,t)$ в градациях серого. Поскольку в таком представлении результат трудно оценивать и сравнивать, мы анализируем среднюю концентрацию Ca^{2+} по пространству, как в предыдущей работе аналогичным образом анализировали суммарное количество вещества от

времени по всему графу [8]. Для вычисления средней концентрации мы используем формулу

$$\left\langle Ca_{cyt} \right\rangle = \frac{\int_0^{x_{end}} Ca_{cyt}(x,t)dx}{x_{end}}.$$

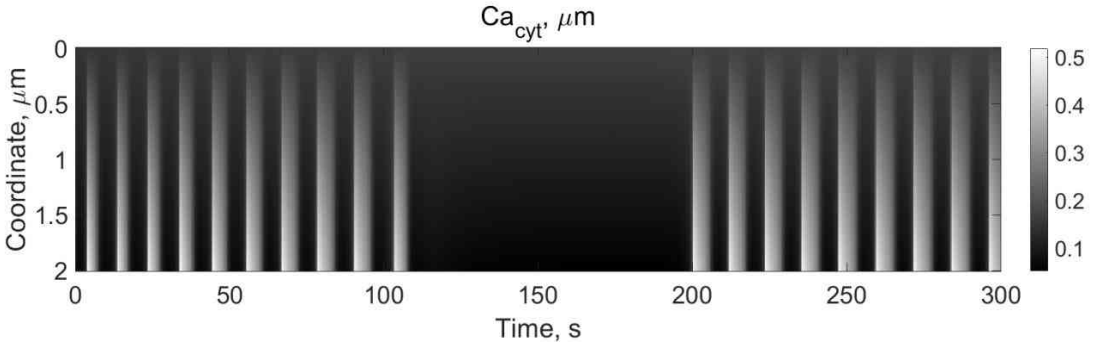


Рис. 2. Пространственно-временное распределение Ca^{2+} в цитозоле, полученное в результате моделирования; типичный результат.

Первичная верификация: сравнение с ОДУ-моделью

Чтобы убедиться в правильности работы новой модели, мы сравниваем даваемые ею результаты с полученными ранее в работе [7]. Мы моделируем различные состояния клетки, такие как норма и патология, при двух видах воздействия: однократные стимулы IP_3 и постоянный синтез IP_3 в состоянии голода. Поскольку в работе [7] представлено по три варианта нормы (norm) и патологии (obese), пронумерованные как 1, 2, 3, мы исследуем систему для каждого из них (итого 12 состояний). Полученные результаты представлены на рис. 3 и 4 (верхние и средние графики).

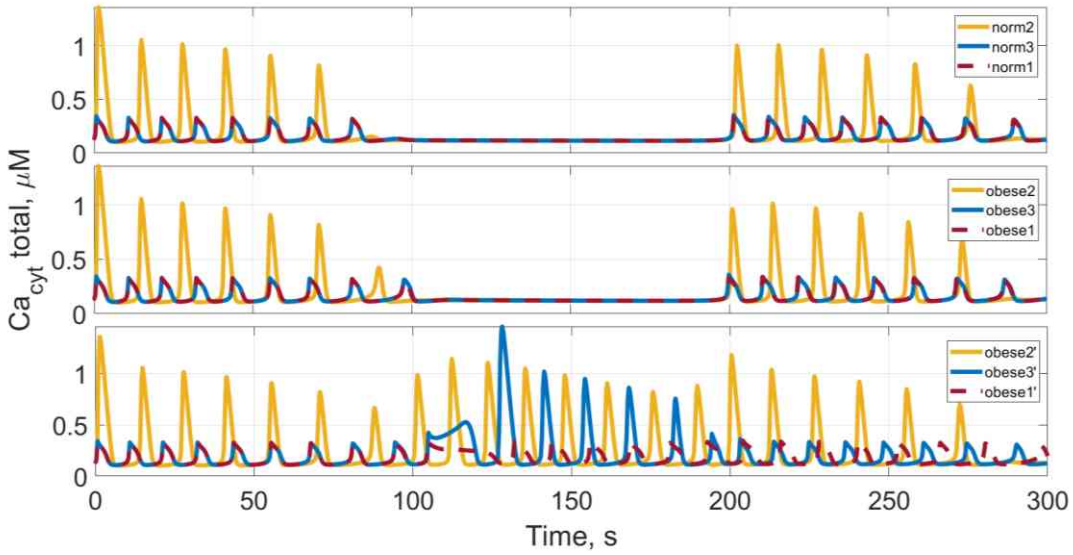


Рис. 3. Графики зависимостей средней по пространству концентрации Ca^{2+} в цитозоле от времени при двух однократных стимулах IP_3 в моменты времени 0 с и 200 с.

Из этих графиков видно, что при обоих вариантах стимула все состояния нормы соответствуют результатам исходной модели [7] (см. верхние графики на рис. 3 и 4), а состояния патологии – нет (см. средние графики на рис. 3 и 4)). При изменении значений некоторых параметров исходной модели удается получить патологическую динамику Ca^{2+} в цитозоле гепатоцита, согласующуюся с результатом исходной модели [7] (см. нижние графики на рис. 3 и 4).

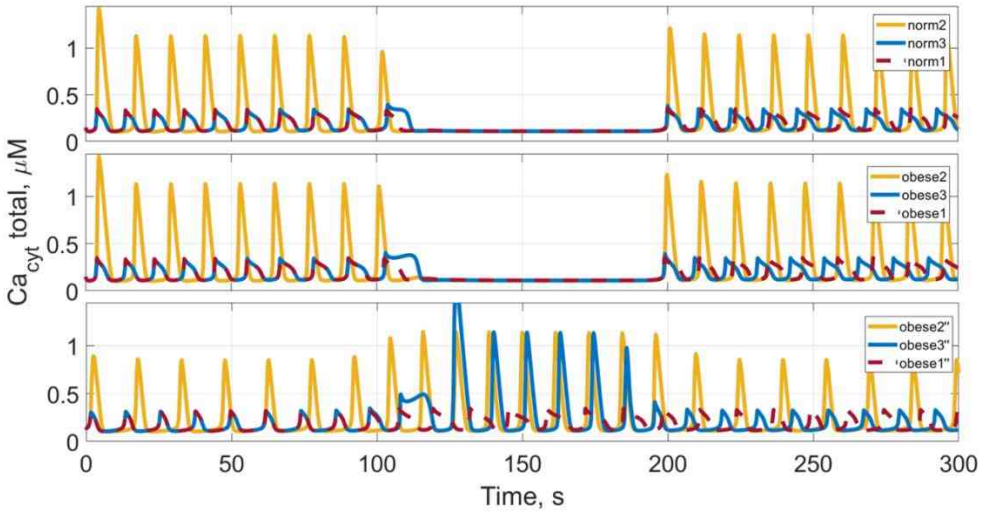


Рис. 4. Графики зависимостей средней по пространству концентрации Ca^{2+} в цитозоле от времени при постоянном синтезе IP_3 в голоде (промежутки 0-100 с и 200-300 с).

Такое различие мы связываем с изменением динамики IP_3 в новой модели по сравнению с исходной [7]. Из рис. 5 видно, что в исходной модели [7] даже в состоянии приема пищи (промежуток 100-200 с) уровень IP_3 достаточно высок, чтобы вызвать кальциевый ответ (IP_3 задается константой, не зависящей от времени). В новой модели мы описываем более реальную физиологически ситуацию, когда в состоянии приема пищи уровень IP_3 снижается.

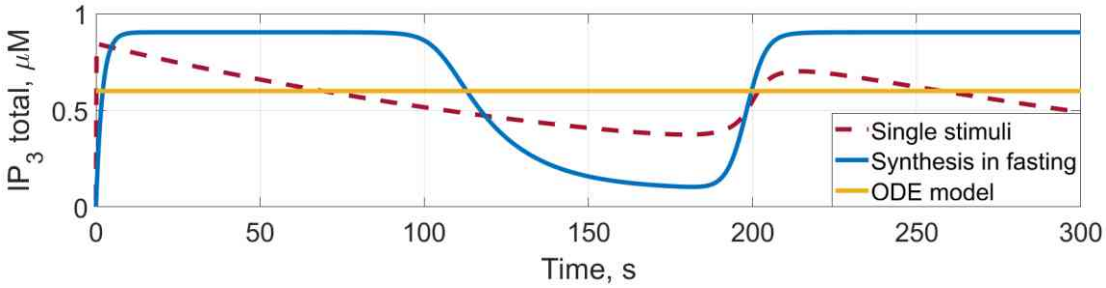


Рис. 5. Графики зависимостей средней по пространству концентрации IP_3 в цитозоле от времени для исходной модели [7] и двух вариантов новой модели: однократные стимулы в моменты времени 0 с и 200 с; постоянный синтез IP_3 в голоде (0-100 с и 200-300 с).

Результаты моделирования

В качестве фактора влияния на динамику Ca^{2+} в цитозоле гепатоцита нас особо интересует взаимное расположение органелл, поскольку протяженность модели является ключевым отличием от исходной модели [7]. Ввиду простоты геометрии модели мы можем варьировать лишь длину отрезка, представляющего узкое пространство цитозоля между органеллами. Здесь мы снова моделируем оба описанных выше варианта стимула IP_3 и для наглядности приводим на рис. 6 графики для состояния нормы (состояние патологии тоже рассматривалось, но графики мы не приводим, поскольку они неинформативны).

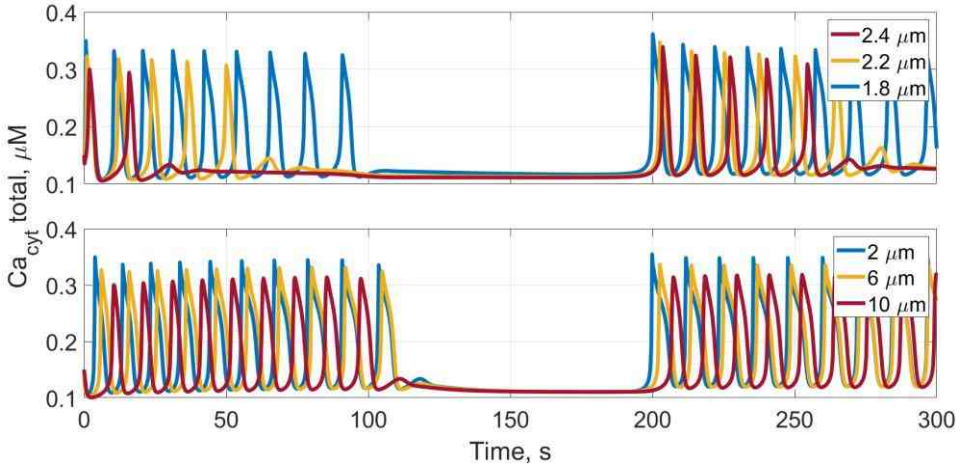


Рис. 6. Графики зависимостей средней по пространству концентрации Ca^{2+} в цитозоле от времени для разных длин отрезка; верхний график: при двух однократных стимулах IP_3 в моменты времени 0 с и 200 с; нижний график: при постоянном синтезе IP_3 в голоде (промежутки 0-100 с и 200-300 с).

На основе рис. 6 можно сделать следующие выводы: при увеличении длины отрезка 1) амплитуда колебаний цитозольного Ca^{2+} уменьшается, 2) задержка начала колебаний относительно времени стимула увеличивается, 3) в случае однократных стимулов IP_3 колебания, инициированные им, затухают быстрее.

Заключение

В данной работе мы построили модель внутриклеточной диффузии Ca^{2+} на отрезке как расширение ранее опубликованной ОДУ-модели. Связь УРЧП- и ОДУ-моделей реализована при помощи ГУ: решение уравнений ОДУ-модели находится в правой части ГУ третьего рода для уравнения диффузии. Также мы провели первичную верификацию модели путем сравнения ее результатов с результатами ОДУ-модели и рассмотрели условия работы обеих моделей, повлиявшие на различия в некоторых результатах.

Исследуя влияние взаимного расположения органелл внутри гепатоцита на формирование и динамику внутриклеточных волн Ca^{2+}, мы выявили, что при увеличении длины моделируемого отрезка амплитуда колебаний цитозольного Ca^{2+} уменьшается, задержка начала колебаний относительно времени стимула увеличивается, а также в случае однократных стимулов IP_3 колебания затухают быстрее.

Список литературы:

1. Berridge M. J., Lipp P., Bootman M. D. The versatility and universality of calcium signalling. Nat. Rev. Mol. Cell Biol. 1, 11-21 (2000).
2. Clapham D. E. Calcium signaling. Cell. 131(6), 1047–1058 (2007).
3. Oliva-Vilarnau N. et al. Calcium signaling in liver injury and regeneration. Front. Med. 5, 192 (2018).
4. Семенова С. Б. Принципы формирования кальциевого сигнала в клетках эукариот. Цитология. 62(9), 611-622 (2020).
5. Amaya M. J., Nathanson M. H. Calcium signaling in the liver. Compr. Physiol. 3(1), 513-539 (2013).
6. Krols M., Bultynck G., Janssens S. ER–Mitochondria contact sites: A new regulator of cellular calcium flux comes into play. J. Cell Biol. 214(4), 367-370 (2016).
7. Dokukina I. V. et al. Calcium-dependent insulin resistance in hepatocytes: mathematical model. J. Theor. Biol. 522, 110684 (2021).
8. Гостева И. В., Мартышина А. В. Численное решение уравнения диффузии на геометрических графах различной топологии. Современная наука: актуальные проблемы и

перспективы развития : Материалы и доклады Международной научно-практической конференции, Княгинино, 08–15 мая 2024 года. 19-22 (2024).

ОСОБЕННОСТИ МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕЛКОВЫХ СИСТЕМ

Кулакова А.М.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Химический факультет, кафедра физической химии, г. Москва

Введение

В современной молекулярной биологии и биоинженерии необходимо понимание механизмов функционирования белков на атомном уровне. Экспериментальные методы, такие как рентгеноструктурный анализ, криоэлектронная микроскопия или ЯМР-спектроскопия, предоставляют статическую (усредненную по ансамблю) информацию о макромолекулах. Однако для выяснения механизмов ферментативного катализа или, например, механизмов конформационных изменений в белках требуется проследить эволюцию системы во времени с фемтосекундным разрешением. Единственным инструментом, способным обеспечить такое пространственно-временное разрешение для биомакромолекулярных систем является молекулярное моделирование. Специфической особенностью этих систем с точки зрения моделирования является их огромный размер: белковые глобулы состоит из тысяч атомов, а моделирование их функционирования также требует тщательного учета окружения, что доводит общее число частиц в модельной системе до сотен тысяч. Далее будут рассмотрены методы описания биологических макромолекул, а также некоторые аспекты подготовки системы, связанные с протонированием аминокислотных остатков. Данные аспекты часто недооценивается начинающими исследователями, однако ошибка в определении протонированного состояния активного центра способна полностью обесценить результаты длительных и ресурсоемких расчетов.

Методы описания молекул

Наиболее распространённым методом полноатомного описания белковых объектов является метод молекулярной механики, или «силовых полей», который рассматривает атомы как заряженные частицы, соединенные «пружинами» различной жёсткости. Силовым полем называют набор формул, определяющих энергию системы как сумму потенциалов внутримолекулярных и межмолекулярных взаимодействий, а также параметры, фигурирующие в этих формулах. Наиболее часто внутримолекулярные взаимодействия описываются гармоническими потенциалами, учитывающими энергию колебаний валентных связей ($E_{св.}$), энергию валентных углов ($E_{уг.}$), энергию двугранных углов ($E_{двугр.}$), а межмолекулярные взаимодействия включают электростатические ($E_{эл.}$) и взаимодействия Ван-дер-Ваальса ($E_{ВдВ}$). Также могут присутствовать и другие вклады в энергию ($E_{другие}$), описывающие специфические взаимодействия. Общая формула такова:

$$E = E_{св.} + E_{уг.} + E_{двугр.} + E_{эл.} + E_{ВдВ} + E_{другие}. \quad (1)$$

При описании белковых систем в качестве $E_{другие}$ важно включать в рассмотрение внеплоскостные углы ($E_{внепл.}$), описывающие угол между четырьмя атомами, которые должны находиться в одной плоскости, а также E_{CMAP} описывающая φ- и ψ- двугранные углы полипептидной цепи. Наиболее часто используемыми силовыми полями для описания белковых систем являются AMBER, CHARMM и OPLS.

Силовые поля – единственный на сегодняшний день подход, позволяющий проводить полноатомное молекулярно-динамическое моделирование макромолекул на физиологически значимых временных масштабах. Однако они неспособны описывать фотофизические процессы, а также процессы разрыва или образования химических связей, что критически важно при изучении ферментативного катализа. В таких случаях применяется комбинированный метод квантовой механики / молекулярной механики (КМ/ММ).

Метод КМ/ММ предполагает разделение молекулярной модели на две подсистемы (Рис. 1): активный центр белка, где происходит химическая или фотохимическая реакция, описываемый методами квантовой химии (КМ-подсистема), и вся остальная часть белковой макромолекулы, включая молекулы растворителя, описываемая с помощью классических силовых полей (ММ-подсистема). Дополнительно может быть использована и континуальная модель растворителя. Такой подход позволяет сочетать точность квантовой химии с вычислительной эффективностью силовых полей. [1]

В КМ/ММ моделировании важным аспектом является правильный выбор КМ-подсистемы. Часто в неё включают непосредственных участников химических или фотохимических процессов, а также ближайшее окружение, непосредственно влияющее на них за счет ионных или водородных связей. Стоит помнить, что увеличение квантовой подсистемы ведет к большим вычислительным затратам.

В отсутствии необходимости изучения химических или фотохимических реакций ограничиваются методом силовых полей, а при необходимости ускорения вычислений за счет уменьшения размерности системы используют крупнозернистые модели или модели обобщенных атомов (coarse-grained model).

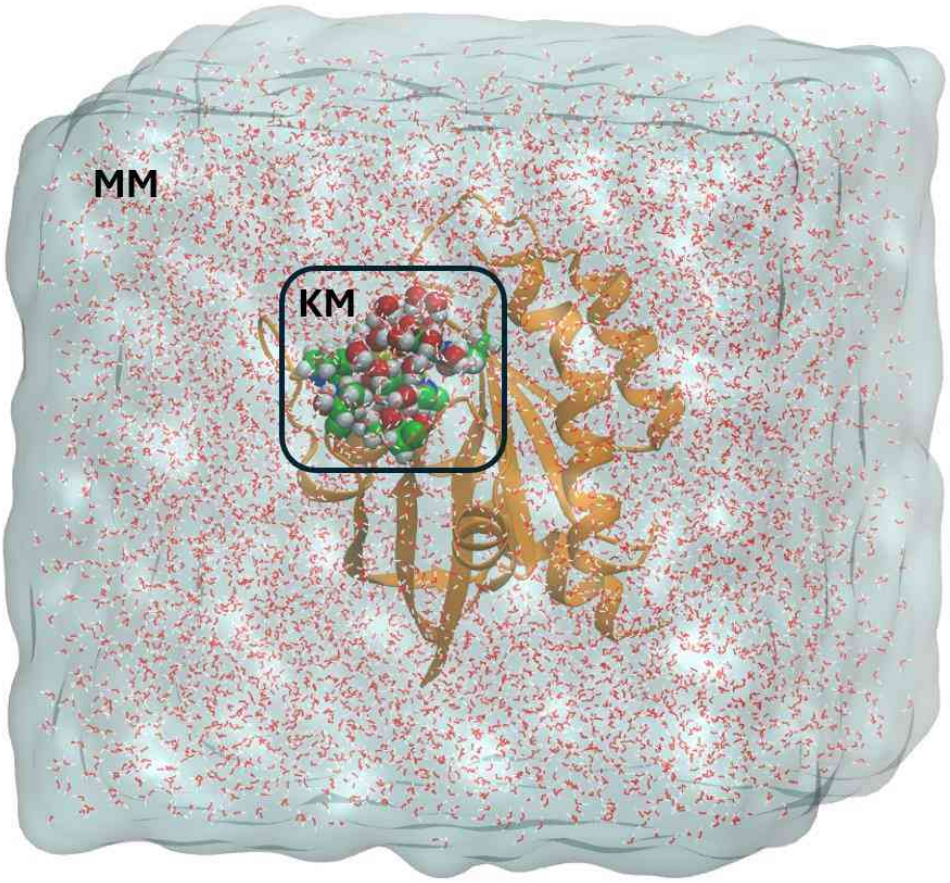


Рисунок 1. Полноатомная модель белкового комплекса KRAS с лигандом. В квантовую подсистему (КМ) включены непосредственные участники химической реакции, а также их ближайшее окружение (выделены ван-дер-Ваальсовыми сферами), прочие атомы включены в молекулярно-механическую подсистему (ММ). Цветовая схема: зеленым обозначены атомы углерода, красным – кислорода, синим – азота, белым – водорода.

Особенности подготовки белковых молекул к моделированию

Белковые молекулы представляют собой полипептидную цепь, составленную из двадцати природных аминокислот. Боковые цепи некоторых аминокислот в зависимости от pH среды или локального электростатического окружения способны присоединять или отдавать протон. Это аминокислотные остатки с карбоксильными группами (аспартат, глутамат, pKa 3.1), аминогруппой (лизин, pKa 10.8) или гуанидиниевой группой (аргинин, pKa 12.5), а также тиольной группой (цистеин, pKa 8.3). Однако наибольшее число проблем вызывает имидазольное кольцо гистидина. Его pKa 6.5 находится близко к физиологическому диапазону, что делает гистидин уникальным участником ферментативного катализа. Например, он является одним из остатков каталитической триады сериновых протеаз. В зависимости от того, как протонированы атомы азота N_δ и N_ε, гистидин может выступать как донор или акцептор водородной связи или как переносчик заряда (Рис. 2).

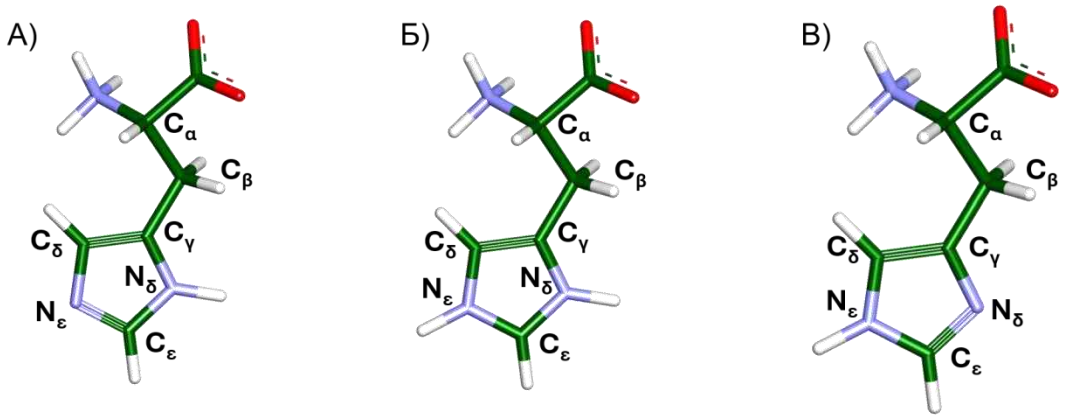


Рисунок 2. Зарядовые формы гистидина. А) δ-форма, Б) протонированная форма, В) ε-форма.

В ферментах активный центр часто содержит аминокислотные остатки, которые должны находиться в строго определенном протонированном состоянии для протекания катализа. [2] При описании системы в рамках классических силовых полей протонированное состояние аминокислотных остатков не может изменяться в ходе моделирования. В рамках квантовых или комбинированных КМ/ММ методов протонированное состояние аминокислотных остатков может изменяться, однако количество атомов в процессе моделирования не изменяется, поэтому протон уходя с одного остатка должен перейти на какой-то другой. Поэтому задание правильных протонированных состояний в самом начале моделирования позволит избежать некорректных расчетов.

Другим важным аспектом при моделировании является окружение биомакромолекулы. Любая белковая глобула существует не в вакууме, а в сложной, гетерогенной среде. Выбор способа описания этой среды — физиологический раствор, липидный бислой мембраны или цитозоль с высоким содержанием макромолекул — не менее важен, чем параметризация самого белка. Пренебрежение свойствами окружения способно исказить результаты расчёта сильнее, чем погрешности выбранного способа описания системы.

Классическим подходом к моделированию растворителя долгое время являлись неявные (континуальные) модели, описывающие растворитель как некий континуум с заданной диэлектрической проницаемостью. Главное преимущество таких моделей – низкие вычислительные затраты за счет отсутствия полноатомного описания растворителя. Однако неявные модели принципиально не способны воспроизвести эффекты водородных связей исследуемой молекулы с растворителем. Поэтому золотым стандартом сейчас являются явные модели растворителя, где каждая молекула растворителя описывается аналогично исследуемой молекуле (полноатомно).

При использовании явного растворителя необходимо помнить об ионном составе раствора. Добавление в моделируемую систему ионов Na^+ и Cl^- до концентрации 0.15 М (физиологический раствор) не только нейтрализует суммарный заряд белка, но и критически влияет на его структурную стабильность, экранируя избыточные электростатические взаимодействия на поверхности белковой глобулы.

Совершенно иного подхода требует моделирование мембранных белков, составляющих до трети всех лекарственных белковых мишеней. В данных случаях окружением выступает липидный бислой, от состава которого напрямую зависит функция белка. Таким образом, грамотное описание окружения обеспечивает релевантность последующего молекулярного моделирования.

Заключение

При молекулярном моделировании белковых систем особенно важным является самый первый этап – выбор способа описания системы и корректный учет окружения системы (водный раствор, физиологический раствор, мембрана), а также корректный учет соответствующих протонированных состояний аминокислот как на поверхности белковой системы, так и внутри неё. Только взвешенный баланс между точностью квантово-химических методов, вычислительной эффективностью силовых полей при адекватном описании белковой

макромолекулы и её окружения позволит получить результаты моделирования, имеющие реальную предсказательную силу для биологии и медицины.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (регистрационный номер 121031300176-3) с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы:

1. М.Г. Хренова, Т.И. Мулашкина, А.М. Кулакова, И.В. Поляков, А.В. Немухин. Компьютерное моделирование механизмов ферментативных реакций: уроки 20-летней практики // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. — 2024. — Т. 65, № 2. — С. 87–95.
2. А.Р. Блинова, А.М. Кулакова, Б.Л. Григоренко. Механизм депротонирования аминогруппы глутамата при связывании с n-ацетилглутаматсинтазой // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. — 2024. — Т. 65, № 4. — С. 312–318.

ОСОБЕННОСТИ SPICE-СИМУЛЯЦИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОНОВ ФИТЦХЬЮ-НАГУМО И ХИНДМАРШ-РОЗЕ

Коротков В.В., Мантуров А.О.

Поволжский институт управления им. П.А.Столыпина – филиал РАНХиГС, г. Саратов

Введение

Математические модели нейронной активности, такие как модель ФитцХью-Нагумо (ФХН) [1,2] и модель Хиндмарш-Розе (ХР) [3], являются фундаментальными инструментами современной нейронауки. Однако их прямое численное моделирование, особенно для развитых ансамблей нейронов [4], предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам. Альтернативным подходом служит аппаратная (схемотехническая) эмуляция, позволяющая исследовать динамику нейроноподобных систем, основанных на применении моделей ФХН и ХР, в реальном времени. Эффективным методом предварительного анализа таких эмуляторов является SPICE-симуляция [5], которая позволяет верифицировать поведение электронной схемы до её физической реализации. Настоящая работа обобщает особенности SPICE-симуляции радиотехнических моделей нейронов ФХН и ХР на примере двух аппаратных реализаций, различающихся по степени идеализации компонентов и подходу к моделированию нелинейностей

Основная часть

Принятая в работе методология схемотехнического моделирования и построение SPICE-моделей базируются на фундаментальном соотношении между зарядом и током

$$dQ / dt = I,\ Q = CU,\ C = 1$$

что позволяет интерпретировать правые части дифференциальных уравнений моделей нейронов как сумму токов I, а переменные — как напряжения U на интегрирующих ёмкостях (рис.1). При этом используется метод управляемых источников тока (зависимых источников) для I, что минимизирует вычислительные затраты при симуляции и (или) позволяет упростить схемотехническую реализацию. Концептуально, по сути, данный подход сводится к численному моделированию поведения соответствующих аналоговых вычислительных схем (фактически - аналоговых вычислительных машин, [6]).

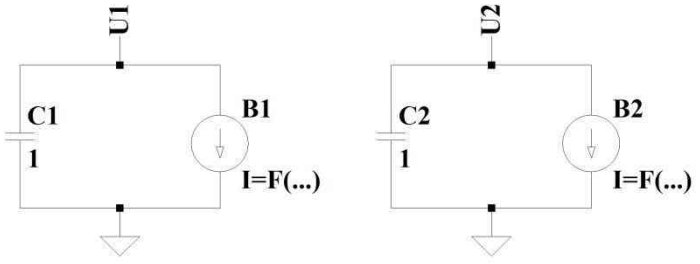


Рисунок 1 - Концепция построения схемотехнических аналогов биологических нейронов. Пример на рисунке соответствует модели второго порядка в виде системы уравнений

$dQ_1 / dt = I_1(Q_1, Q_2)$, $Q_1 = CU_1$, $dQ_2 / dt = I_2(Q_1, Q_2)$, $Q_2 = CU_2$.
Управляемые идеальные источники тока B1 и B2 соответствуют
функциям $I_1(Q_1, Q_2)$ и $I_2(Q_1, Q_2)$

В работе выделяются две стратегии SPICE-симуляции нейроподобных схем на основе моделей ФХН и ХР:

1. Идеализированная (концептуальная) модель (на примере нейрона ХР [3]): в симуляторе LTspice [7] реализована схема с использованием идеальных источников тока, управляемых напряжением (тип B, рис.2). Это позволяет точно воспроизвести кубическую и квадратичную нелинейности модели ХР, а также легко масштабировать схему до уровня подсхемы (subcircuit) для построения сетей (рис.3).
2. Особенностью является пренебрежение паразитными параметрами при дальнейшей натурной реализации и возможность работы (выполнения SPICE-симуляции) с единичной ёмкостью без каких-либо ограничений со стороны вычислительных алгоритмов симулятора, что позволяет не выполнять переход к размерным параметрам и переменным.
3. 2. Минималистичная дискретная модель (на примере моделей нейронов ФХН и ХР): здесь накладываются жёсткие ограничения на элементную базу (отказ от операционных усилителей и аналоговых умножителей, минимум дискретных компонентов и ряд других ограничений, в отличие от известных подходов к моделированию схем с нейроподобной динамикой [8]). Нелинейности аппроксимируются пассивно-активными диодными [9,10] или резистивно-диодными схемами с небольшим числом точек аппроксимации (до 5) [11], что принципиально меняет поведение SPICE-симуляции: для получения корректных результатов возрастает роль выбора метода численного решения (метод трапеций или Gear [12]), что определяется жёсткостью исходных систем уравнений.
4. При верификации результатов SPICE-симуляция идеализированной модели нейрона ХР (с параметрами a=3, b=1, c=1, d=5, s=4, x0=-1.6, μ=0.00215) при управляющем параметре Iext = 3.3 демонстрирует сложнопериодический (хаотический) режим, полностью соответствующий известным результатам математического моделирования [13] (рис.4).

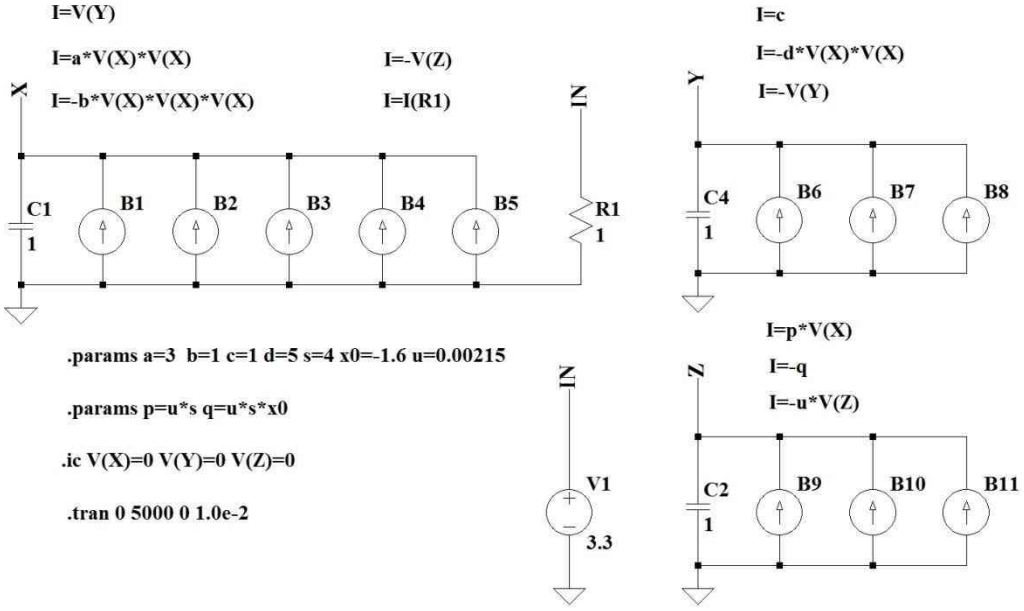


Рисунок 2 - Идеализированная радиотехническая модель ХР биологического нейрона

```
* ~\Neuron\spice\RH\Model_Rose.asc
* Inpiuts/Outputs              X Y Z
.SUBCKT RH_NEURON 1 2 3
C1 1 0 1
B1 0 1 I=V(2)
B2 0 1 I=a*V(1)*V(1)
B3 0 1 I=-b*V(1)*V(1)*V(1)
B4 0 1 I=-V(3)
B5 0 1 I=I(R1)
R1 IN 0 1
C4 2 0 1
B6 0 2 I=c
B7 0 2 I=-d*V(1)*V(1)
B8 0 2 I=-V(2)
C2 3 0 1
B9 0 3 I=p*V(1)
B10 0 3 I=-q
B11 0 3 I=-u*V(3)
V1 IN 0 3.3
.params a=3  b=1 c=1 d=5 s=4 x0=-1.6 u=0.00215
.ic V(1)=0 V(2)=0 V(3)=0
.params p=u*s q=u*s*x0
.ENDS
```

Рисунок 3 - Список соединений (netlist) для идеализированной радиотехнической модели XP биологического нейрона согласно рис.2. Путём несложной модификации (изменения отмечены красным цветом) данный список соединений может быть преобразован в готовую макромодель компонента (subcircuit) RH_NEURON

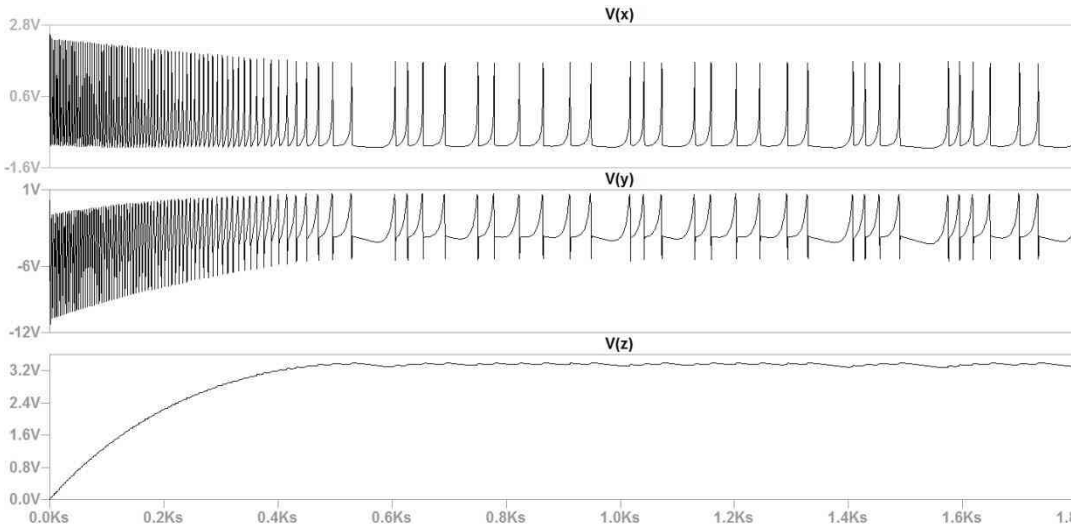


Рисунок 4 - Результаты численного моделирования (симуляции) поведения идеализированной модели РХ-нейрона при помощи симулятора LTspice

Вычислительные затраты при использовании идеализированной модели минимальны, что позволит применять такую модель в задачах моделирования крупных нейронных сетей. Результаты оценки вычислительных затрат приведены на рис.5.

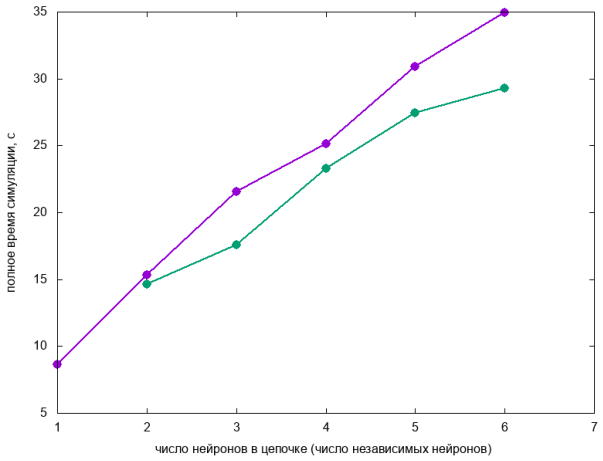


Рисунок 5 - Зависимость полного времени моделирования (total elapsed time) в симуляторе LTspice от параметра «число нейронов». Длительность эпохи симуляции 5кс. Для симуляции использовался компьютер Intel Core i7-3770@3.4GHz 16Gb

Для вычислительного эксперимента была выбрана линейная конфигурация последовательно соединённых нейронов аналогично [14], где параметром симуляции было число последовательно соединённых нейронов (график - зелёная кривая на рисунке). В качестве объекта сравнения проводилось моделирование ансамбля независимых (несвязных) нейронов (фиолетовая кривая). Необходимо отметить, что при повторении данного вычислительного эксперимента с минималистичной дискретной моделью характерное время вычислений оказывается на порядки больше.

В целом, SPICE-симуляция минималистичных дискретных моделей выявила следующие особенности:

- Сходимость к решению явно демонстрирует зависимость от жёсткости модельной системы,
- Для корректного воспроизведения бифуркационных сценариев ФХН и ХР требуется адаптивный шаг интегрирования (использование опций .tran и .uic и явное задание максимального шага),
- Применение аппроксимации нелинейностей с 2-5 точками сохраняет основные динамические режимы (покоя, одиночные спайки, пачки), однако количественные значения управляющих параметров могут смещаться относительно исходной математической модели.

Заключение

Проведённый анализ двух подходов к SPICE-симуляции радиотехнических аналогов нейронов ФХН и ХР позволяет сформулировать следующие особенности:

1. Модели с идеальными источниками тока предпочтительны для качественного анализа нейродинамики и построения крупных сетей, но их физическая реализация требует дополнительной схемотехнической адаптации.
2. Дискретные модели с минимальным количеством компонентов требуют более тщательной настройки параметров симуляции (шага, метода интегрирования) и демонстрируют определённую зависимость динамики от способа аппроксимации нелинейностей.
3. Верификация через SPICE-симуляцию является необходимым этапом при проектировании любых нейроморфных систем на базе моделей ХР и ФХН, позволяя снизить риски при последующей натурной реализации.

Список литературы:

1. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophysical Journal. 1961. Vol. 1, no. 6. P. 445–466. DOI: 10.1016/S0006-3495(61)86902-6.
2. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50, no. 10. P. 2061–2070. DOI: 10.1109/JRPROC.1962.288235.
3. Hindmarsh J.L., Rose R.M. A Model of Neuronal Bursting Using Three Coupled First Order Differential Equations // Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Vol. 221, No.1222. P. 87-102.

4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. - М.:ООО «И.Д.Вильямс», 2016. -1104 с.
5. Madec M, Lallement C, Haiech J. Modeling and simulation of biological systems using SPICE language. PLoS ONE. 2017;12(8):e0182385. DOI: 10.1371/journal.pone.0182385
6. Витенберг И. М. Быстродействующие аналоговые вычислительные машины. — М: Энергия, 1970. — 136 с. — (Библиотека по автоматике ; вып. 411).
7. LTspice Tutorial. Режим доступа: https://youspice.com/getting-started-with-ltspice/ дата обращения 01.08.2025
8. Егоров Н. М. Кольцевой генератор нейроподобной активности с перестраиваемой частотой / Егоров Н. М., Сысоева М. В., Пономаренко В. И., Корнилов М. В., Сысоев И. В. // Известия вузов. ПНД, 2023. — Т.31, № 1. —С. 103 — 120.
9. Binczak S, Kazantsev VB, Nekorkin VI, Bilbault JM. Experimental study of bifurcations in modified FitzHugh-Nagumo cell. Electronics Letters. 2003;39(13):961–962. DOI: 10.1049/el:20030657.
10. Takaishvili LV, Ponomarenko VI, Sysoev IV. Simple tunable generator of neuron-like activity. Chaos, Solitons and Fractals. 2025;196:116316. DOI: 10.1016/j.chaos.2025.116316.
11. Концепция построения электронной модели нейрона Розе-Хиндмарш на основе управляемых источников тока / А. О. Мантуров, И. А. Мантурова, Т. В. Данилова [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2025. – № 9. – С. 52-55. – EDN BEGFNQ.
12. Чуа Леон О., Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем: (Алгоритмы и вычислительные методы). — М.: Энергия, 1980. — 638 с.
13. Захаров, Д. Г. Динамика малого ансамбля нейронов Хиндмарш - Розе при импульсном воздействии / Д. Г. Захаров // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. - 2005. — Т. 13, № 1-2. — С. 100—113.
14. Сконженко Л. А., Красичков Л. В. Распространение импульсов в цепочке элементов с нейроноподобной динамикой // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2003. – Т. 67, № 12. – С. 1697-1700. – EDN OOEIYZ.

Оглавление

Секция «Модели и методы цифровых технологий» 3
ТОНКАЯ НАСТРОЙКА МОДЕЛИ ЭМБЕДДИНГОВ ДЛЯ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОИСКА
Бондарев Д.Е. 3
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОДНОМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ УПРУГОПЛАСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СХЕМЫ КАБАРЕ
Гайворонская Ю.Е., Дерюгин Ю.Н. 4
МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА ОПЕРАЦИИ «ВЫТЯГИВАНИЕ» В САПР «САРУС» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ 3D-ПРОЕКТИРОВАНИЯ
Рыжов С.А., Маврин С.В., Сироткин Д.А., Уразов А.В. 8
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЛАДКОГО СОПРЯЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЗОР МЕТОДОВ)
Космачева К.Д., Старкова А.С., Уразов А.В., Маврин С.В. 12
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЛАДКОГО СОПРЯЖЕНИЯ *B*-СПЛАЙНОВ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЗОР МЕТОДОВ)
Шабалин М.С., Ганчук С.Н., Маврин С.В. 17
МОДЕЛЬ РОЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ
Горькова А.Е. 20
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ИСТОЧНИКАМИ МАССЫ И ТЕПЛА
Гришин Д.А., Маврин С.В. 24
РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОРИСТОЙ ОБЛАСТИ
Ерофеев Е.Н., Маврин С.В. 26
МЕТОДИКА ПОРТИРОВАНИЯ FLUTTER ПЛАГИНОВ ДЛЯ ОС АВРОРА
Овчинников С.М., Звягин К.Н. 30
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
Погудалов Н.В., Вельдин Д.С., Коробов С.А., Лавровская А.Д., Стадник В.В., Глазунов В.А., Гостева И.В. 34
ПОСТРОЕНИЕ СРЕДИННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕТРАЭДРАЛЬНЫХ СЕТОК ДЕЛОНЕ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ
Гурьев В.В. 38
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОГЛОЩАЮЩИХ, РАССЕИВАЮЩИХ И ИЗЛУЧАЮЩИХ СРЕДАХ В «ЛОГОС ТЕПЛО»
Власов Н.С. 41
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБУЧАЕМОГО РАНЖИРОВАНИЯ
Афонина Д.С. 44
АРХИТЕКТУРА ИНТЕГРАЦИИ АППАРАТНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИИ В СРЕДЕ ROS
Добровольский В.А., Ерохина Д.А. 46
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ТЕСТИРОВАНИЮ ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ И РЕАЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕСТОВ
Кирсанов М.К. 49
РАЗРАБОТКА API ИНСТРУМЕНТА НА C++ ДЛЯ РАБОТЫ С КРИВЫМИ
Зыкова А.С., Стожаров О.Е., Данилкин В.В., Рыжов С.Н., Уразов А.В., Ганчук С.Н. 51
РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛА РАБОТЫ С NURBS-КРИВЫМИ
Зыкова А.С., Стожаров О.Е., Данилкин В.В., Рыжов С.Н., Уразов А.В., Ганчук С.Н. 54

Секция «Моделирование физических процессов и явлений» 58
МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИЯХ РАДИАЦИОННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТРУКТУР ШИРОКОЗОННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ
Паршин И.М., Бузоверя М.Э., Мухин Н.П. 58
РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОВЫХОДА СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Коробов С.А., Вельдин Д.С., Кочетков Д.А., Кочетков В.А., Даньков Р.Д., Садовников С.И., Шершенов Н.В. 62
РАЗРАБОТКА СПОСОБА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ДЛИННОМЕРНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ОБРАЗЦОВ
Пухов М.А., Филяев А.А., Горелова Е.В., Мохрова Е.А. 66
ОТ МАГНИТНОГО КОМПАСА К ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ НАВИГАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ
УстиновС. В., АнтоновВ.В., ВолковС.С., ХамитовА.Ф. 69
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ И ЕЁ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРЕГРАДОЙ
Еремин И.А., Куприянов Ф.В. 76
МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИИ ТУК ПРИ МНОГОФАКТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ
Елагин Д. А., Порошин Е. М. 78
ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МНОГОСЕТОЧНОГО МЕТОДА НА ПРИМЕРЕ ОДНОМЕРНЫХ ЗАДАЧ
Морозов Е. П., Замарашкин Н. Л. 82
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТОКОВ НА ПЛАСТИНЕ ПРОЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ ГАЛЕРКИНА С RWG БАЗИСНЫМИ ФУНКЦИЯМИ
Панов П.А., Сетуха А.В. 84
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ НА ТВЕРДОМ ЦИЛИНДРЕ
Головизнин В.М., Козлов Н.М., Попова Н.Н. 88
ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ КОНДЕНСИРОВАННЫХ УГЛЕКИСЛОТЫ И АММИАКА ПРИ МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЯХ
Ботин Д.Г., Маслов Д.А., Козабаранов Р.В. 89
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРА НА МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМАХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ
Бадин В.В. 93
ЯВНАЯ СХЕМА КАБАРЕ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ И УДАРА БАЛКИ ТИМОШЕНКО
Кузнецова Д.Д. 94
РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕТОНАЦИИ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
Банников Н.В., Дерюгин Ю.Н. 98
ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ПЕРЕНОСА ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ФАЗ В ЗАДАЧАХ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОГО DRL-ПОДХОДА ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
Рожков А.А., Козелков А.С., Курулин В.В. 101
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА
Абрамова А.А. 103
ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА RS-553
Федотова А.В., Аниськин М.В., Назаров Д.В., Пушков В.А., Скляднева Т.О., Терешкина И.А., Трунин И.Р., Ткаченко М.И., Симаков В.Г., Гнутов И.С. 106
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТИ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ
Коваль Р.И., Диденкулов И.Н., Прончатов-Рубцов Н.В. 111
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ С ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ В ПАРАХ РТУТИ НА КСВ
Тарасов Д. С., Желтухин В. С., Савин А. Ю., Шемахин Е. Ю., Киселёв Г.Б. 115
ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ AlxGa1-x/GaAs
Абрашкина М.В., Дюбуа А.Б, Сафошкин А.С., Шапошников И.А., Шапошников Н.А. 117
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАФЕНОВЫХ СТРУКТУРАХ
Абрашкина М.В., Дюбуа А.Б, Казарян Р.Г., Сафошкин А.С., Шапошников И.А., Шапошников Н.А. 120

Школьная секция 123
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СОРТИРОВКА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДОВ МУСОРА ПО ФОТОГРАФИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
Гончарова А.С. 123
ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ
Кочедыков А. А., Трофимович С. Х. 125
БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ. ФОТОСЪЕМКА С ПОМОЩЬЮ БПЛА. ОБЗОР
Цылев Н.В., Кудрявцев А.В., Трофимович С.Х. 135
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА СПУТНИКА НА ОСНОВЕ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА
Рохмистрова О.А. 145
КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОСТОЙ МОДЕЛИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
Самодолов Л.А. 155
КОД СОРТИРОВКИ
Орлова Е.А., Яхонтова К.О. 158
РАЗРАБОТКА МУЛЬТИИНСТРУМЕНТА (БОТА) ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ
Мотов А.Д., Загороднюк Ю.А. 161
БОТ PERSONAL ASSISTANT – ПОМОЩНИК, В КАРМАНЕ (ПЕРСОНАЛЬНЫЕ АССИСТЕНТЫ И ЧАТ-БОТЫ: АНАЛИЗ КАЧЕСТВА, ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ) 170
Юдаков. А.А., Побожьев С.К. 170

Секция «Математические методы в экономике и социологии» 172
НЕЙРОБИОЛОГИЯ МАРКЕТИНГА: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ МОЗГА НА ЦЕНУ, БРЕНД И ВИЗУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН
Тенишева А.С. , Бродская Е.А. 172
СТРАТЕГИЧЕСКАЯ ОРИЕНТАЦИЯ РОССИЙСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ: МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РАЗВИТИЕМ
Виноградов Н.В. 175
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА РФ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ГЛОБАЛЬНЫМ ВЫЗОВАМ
Кузнецова С.Н. 177
ПОЛИТИКА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ: УСПЕХИ, ПРОВАЛЫ И РЕАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОИЗВОДСТВО
Хрущева Ю.О., Дудин Д.М., Сидоров В.А., Умановский А.Е. 181
АНАЛИЗ СВЯЗИ МЕЖДУ УРОВНЕМ КОРПОРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ И СТОИМОСТЬЮ КОМПАНИИ НА РАЗВИВАЮЩИХСЯ РЫНКАХ
Назарова Е.Н., Кузнецов В.П. 182
ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗА «ИДЕАЛЬНОГО РАБОТОДАТЕЛЯ» ДЛЯ ВЫПУСКНИКОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ (ПО ДАННЫМ ОПРОСА В САРФТИ НИЯУ МИФИ)
Максимова Е.А., Блохин К.М. 186
АНАЛИЗ ПОЛИТИЧЕСКИХ, ЭКОНОМИЧЕСКИХ, СОЦИАЛЬНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МИРЕ И РОССИИ
Мисатюк Е.В. 189
ПРОБЛЕМА РАСКРЫТИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРИ IPO НА РОССИЙСКОМ ФОНДОВОМ РЫНКЕ И СПОСОБЫ ЕЁ РЕШЕНИЯ В РАМКАХ ЗАЩИТЫ МИНОРИТАРНЫХ АКЦИОНЕРОВ
Толоконников В.Е. 192
ВЛИЯНИЕ СТУДЕНЧЕСКОГО ЯЗЫКОВОГО КЛУБА НА АКАДЕМИЧЕСКУЮ МОТИВАЦИЮ И КОММУНИКАТИВНОЕ РАЗВИТИЕ ОБУЧАЮЩИХСЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА (НА ПРИМЕРЕ КЛУБА «FOX VOX» САРФТИ НИЯУ МИФИ)
Самойлова П. С., Вихарева Ю. В., Ерунов Д. Н., Стародубцева Е.А. 195
МЕТОД ЛИНЕАРИЗАЦИИ В ПОСТРОЕНИИ ДИАГРАММ ПОКУПАТЕЛЬСКОЙ СПОСОБНОСТИ С ОПОРОЙ НА АРХЕ-ПСИХОТИПИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ
Вдовкин А.Л., Коробов С.А., Конькова М.И. 196

ПЛАНИРОВАНИЕ ФИНАНСОВО – ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СарФТИ НИЯУ МИФИ
Шишкова А.С., Аникина М.П. 199
НЕЧЁТКАЯ ЛОГИКА В ОЦЕНКЕ «КАЧЕСТВА ЖИЗНИ»: ИНТЕГРАЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ ИНДИКАТОРОВ
Марагина В.Ю., Самохвалова А.Д. 201
ОПК КАК ДРАЙВЕР РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ
Стадник В. В. 204
ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РОССИЙСКУЮ ЭКОНОМИКУ
Стадник В.В. 206
КАДРОВЫЙ ГОЛОД
Сергеева А.С., Паюрова Е.А. 209
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФИНАНСОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ
Мотина А.С. 212
ЧИСЛЕННЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ТРУДОВОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ «РАБОТНИК-РАБОТОДАТЕЛЬ»
Грахольская Л.В., Мантуров А.О. 217
МАРКЕТИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ В ВЫБОРЕ УСЛУГ ОПТИКИ Г. САРОВ
Петунина Е. О., Пасечникова Л.В., Ломтева Е.Е. 221
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ ЖЕНСКИХ ЗИМНИХ ПУХОВИКОВ В ГОРОДЕ САРОВ
Хижнякова Е. Д., Пасечникова Л.В., Асташкина А.М. 224
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ МУЖСКОЙ СПОРТИВНОЙ ОБУВИ В Г. САРОВ В 2025 Г.
Демин Д.Л., Пасечникова Л.В., Самофал А.С. 228
МАРКЕТИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ РЕСТОРАНОВ В Г. САРОВ
Пичагина Ю.А., Пасечникова Л.В., Ометова О.Н. 231
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ СЕРВИСОВ В Г. САРОВ В 2025 Г.
Солдатов С.Д., Пасечникова Л.В., Додин А.А. 235
МАРКЕТИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКУПАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НА РЫНКЕ КОФЕЕН В Г. САРОВ
Калашникова А.Ю., Юткина Е.Г. 239
МАРКЕТИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ НА РЫНКЕ ДОСТАВКИ БЫСТРОЙ ЕДЫ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА САРОВ
Новиков А.Г., Пасечникова Л.В., Овсянникова Л.В. 242

Секция «Безопасность информационных и технических систем» 247
АНТИКРИЗИСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
Мотина А.С., Самсонова Д.А. 247
РАЗРАБОТКА АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ
Шувалов Е.А., Ясюк В.О. 250
КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОСЛОЙНОГО ВИРТУАЛЬНОГО АДАПТАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА
Дюпин В.Н. 254
МНОГОФАКТОРНАЯ ЗАЩИТА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ ОТ АТАК ПОДМЕНЫ ЛИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ 3D-ГЕОМЕТРИИ ЛИЦА
Сарлейский А.В., Копейкин А.Э., Михеева К.Н., Клокова В.К., Суров А.Н. 255
ПОДХОД ПО СОЗДАНИЮ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ
Синькова К.В. Дюпин В.Н. 258

УСТАНОВКА, НАСТРОЙКА, АДМИНИСТРИРОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКТАМИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ SECRET NET STUDIO
Яковлев Н.С., Романова М.Д. 260
БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ Wi-Fi СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
Устинов С. В., Голубенко М.А., Кузнецов М.С. 263
ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИСКРЕЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ КАК КОНЕЧНЫЙ АВТОМАТ С КОНТЕКСТНО-ЗАВИСИМЫМИ ПЕРЕХОДАМИ
Кузнецова А.М. 270
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖИЛ RGB КАБЕЛЯ VGA НА ЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
Маскайкин А.В. 271
ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ СИММЕТРИЧНОГО ШИФРОВАНИЯ
Шувалов Е.А., Ясюк В.О. 272
АНАЛИЗ КРИТИЧЕСКИХ УЯЗВИМОСТЕЙ В ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
Шпак Д.С., Ершов А.А., Кошкин В.В., Дорофеев С.А., Малоземов А.А. 275
КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ И КВАНТОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕЙ
Шавров Е.Д., Вовк Н.Н., Сергеев Д.В. 280
ОБЗОР МЕТОДОВ РЕВЕРСИВНОГО ИНЖИНИРИНГА ПРИЛОЖЕНИЙ
Чернышов С.А., Груздев С.В, Казаков А.А., Евстифеев А.А., Красильников Б.А. 283
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ С ПАРАМЕТРАМИ, ПРИБЛИЖАЮЩИМИСЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ
Чернышов Д.В., Марунин М.В. 286
ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫЕ МОДЕЛИ, АНАЛИЗЫ РИСКОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ В СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ
Солодилов В.В., Николаева И.А. 290
РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ РЕАГИРОВАНИЯ НА УЯЗВИМОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
Сергеева О.А., Дротенко А.А., Седаков А.В. 295
РАЗВИТИЕ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДОЛОГИИ ПОСТКВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ: ОТ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ К ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ
Пасько Н.С., Фомченко В.Н. 300
ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ В ПЕРИМЕТРОВЫХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ
Николаев Н.Д. 303
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ АРХИТЕКТУРАМИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
Мартынова И.А., Запонов Э.В., Лебедева А.В. 306
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АТАК НА СИСТЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
Лушкина Н.М. 310
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В БОРЬБЕ С ХАКЕРСКИМИ АТАКАМИ
Комаров О.М., Тюхтин А.А., Мартынов А.П. 314
ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СЦЕНКИ СТОЙКОСТИ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОТОКОЛОВ В УСЛОВИЯХ КВАНТОВЫХ УГРОЗ
Кащеев В.М., Соколова Я.В. 318
РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ
Иванов Н.С. 321
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИВАТНОСТИ И СОЗДАНИЕ ЗАЩИЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ В ОБУЧЕНИИ
Грачева А.Н., Рыжов А.А., Точилин А.В. 324
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 328
Горбатенко Н.В., Мартынов А.П. 328

ЭТАПЫ И РЕГЛАМЕНТ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
Горбатенко Н.В., Ведерников В.Л. 330
ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
Ботова Е.А., Малоземов А.А. 334
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ
Аркадьев С.Ю., Николаева И.А. 337

Секция «Современные программные комплексы и системы в математическом моделировании» 342
АНСАМБЛЕВАЯ ДИСТИЛЛЯЦИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ ДЕТОКСИФИКАЦИИ АРАБСКОГО ТЕКСТА
Фоломкин И.Н., Лукьянов А.А., Колпаков М.М. 342
МОДЕЛЬ ЛЕНДИНГА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИВЛЕЧЕНИЯ АБИТУРИЕНТОВ УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СарФТИ НИЯУ МИФИ
Маркин А.В., Цыганов М.А., Кирпиченко Э.В., Соловьев Т.Г. 346
ДИАЛОГОВЫЕ СИСТЕМЫ И ЧАТ-БОТЫ В ПРЕПОДАВАНИИ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ
Вихарева Ю.В. Барченкова С.А. Забусова С.В., Пантеев С.А., Стародубцева Е.А., Соловьев Т.Г. 349
ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ СНИЖЕНИЯ МАССЫ ИЗДЕЛИЙ .....
Полин И.А., Хрущёва Ю.О. 350
ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ЗАПРОСОВ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ
Селивохин Я.А. 353
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА РИСКОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА «ОХРАНА ТРУДА»
Посацкова А.С., Романова М.Д. 354
ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЦИФРОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ В ИНОЯЗЫЧНОМ ОБРАЗОВАНИИ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ
Вихарева Ю.В., Барченкова С.А., Стародубцева Е.А. 358
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНОЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ
Разуваева А.Р., Сироткина А.Г. 360
ПЕРСОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ СПИСКОВ МУЗЫКАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ
Чередниченко К.-А.Е., Юферева Т.В. 363
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ЭТАЛОНОВ В СИСТЕМАХ 3D-ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ
Копейкин А.Э., Сарлейский А.В., Михеева К.Н., Васюкова О.Е. 364
ЭРГОНОМИКА КЛАВИАТУРЫ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ РАСКЛАДКИ
Куприянов Ф.В., Ерёмин И.А., Шкаев Р.Е. 367
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЯ
Ерунов Д.Н., Кирпиченко Э.В., Рябков А.В., Соловьев Т.Г. 369
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЕРА С ПОМОЩЬЮ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА В QT
Самойлова П. С., Алексеев В.В. 372
СРАВНЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ СХЕМЫ HPC И СХЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ KUBERNETES
Поздяев А.Е. 374
РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПЕРЕНОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА «КАБАРЕ» 375
Ерошкина М.С., Дерюгин Ю.Н. 375

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ В PYTHON С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕК MATPLOTLIB И TKINTER
Крупнова С.А., Романова М.Д. 377
СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ СКОРОСТИ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
Бадретдинов Р. В., Дмитриева А. П. , Нечаев Н. С. 380
РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА, ПРЕДОСТАВЛЯЮЩЕГО БАЗОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОСТОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ФОРМАТЕ ЕФР И КОНВЕРТАЦИИ ИХ В ФОРМАТ VTK
Барышев И.О., Холушкин В.С., Алексеев В.В. 383
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ DODECANE SHOCK TUBE ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ РАВНОВЕСИИ СХЕМОЙ КАБАРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕЛАКСАЦИИ
Головня Н.А., Головизнин В.М. 385
ФАЙЛООБМЕННИК РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФСТЭК НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ GO
Копылов К.С., Андронов Е.А., Шкаев Р.Е. 389
УМНЫЙ ПОИСК СВОБОДНЫХ АУДИТОРИЙ
Савельев Н.С., Рябков А.В. 391
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УСТОЙЧИВОСТИ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОБОБЩЁННЫХ ИНДЕКСОВ КИРХГОФА
Ахметова К.Н., Матвеев С.А. 393
ARXIV RESEARCH ASSISTANT: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АГЕНТ ДЛЯ НАУЧНОГО ПОИСКА
Колпаков М. М. 395
ПОСТРОЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕДУЦИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ В ПРОГРАММНОМ МОДУЛЕ «ЛОГОС ПЛАТФОРМА»
Будникова И.В. 399
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОПОСТИНГА
Дураев Д.С., Холушкин В.С. 403
АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОМ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДЕ ПРИ П–ОБРАЗНОМ КРАЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
Коробов С.А., Чернявский В.П. 404
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВОЙ ХИМИИ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В МОДЕЛИРОВАНИИ ЛИПОФИЛЬНОСТИ АЗОМЕТИНОВ С ДЛИННЫМИ АЛКИЛЬНЫМИ ЗАМЕСТИТЕЛЯМИ
Серов Н.Ю., Хаяров Х.Р., Галкина И.В., Григорьев В.А., Гимадиев Т.Р. 411
ТЕРМОДИНАМИКА КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ И КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СТРУКТУР КОМПЛЕКСОВ ОКСОВАНАДИЯ(IV) С БИОЛИГАНДАМИ
Уразаева К.В., Серов Н.Ю., Бухаров М.С., Штырлин В.Г. 413
МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ДОКИНГ ГЕТЕРОЛИГАНДНЫХ КОМПЛЕКСОВ МЕДИ(II) С 1,10-ФЕНАНТРОЛИНОМ И ДИТИОКАРБАМАТАМИ
Бухаров М.С., Чжуан Синьхао, Штырлин В.Г. 417

Секция «Математическое моделирование в биофизике»..... 421
ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ NAC1 НА СТРУКТУРУ БЕЛКОВОЙ ПЛЕНКИ
Леонтьева А.М., Бузоверя М.Э. 421
ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ИК СПЕКТРОВ ХРОМЕНОПИРИДИНОВ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
Ивлиева (Перетокина) И.В., Мещерякова А.А., Бабков Л.М., Сорокин В.В. 424
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОВАЛЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ТЕТРАПЕПТИДА НАЕЕ С НЕЙТРАЛЬНЫМИ АМИНОКИСЛОТАМИ
Брыксин К.А., Пластун И.Л., Яковлев Р.Ю., Козин С.А. 427
ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИФФУЗИИ В ДЕНДРИТНОМ ШИПИКЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ
Вельдин Д.С., Коробов С.А., Лавровская А.Д., Погудалов Н.В., Стадник В.В., Глазунов В.А., Гостева И.В. 431

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ В ЦИТОЗОЛЕ ГЕПАТОЦИТОВ
Мартышина А.В., Гостева И.В.....435
ОСОБЕННОСТИ МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕЛКОВЫХ СИСТЕМ
Кулакова А.М.....440
ОСОБЕННОСТИ SPICE-СИМУЛЯЦИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОНОВ ФИТЦХЪЮ-НАГУМО И ХИНДМАРШ-РОЗЕ
Коротков В.В., Мантуров А.О.....443