

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**САРОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА
«МИФИ»**

«Утверждаю»

Председатель комиссии

_____ В.В.Алексеев

**КОМПЛЕКС ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО
ГАЗОДИНАМИКЕ**

**Отчет по
ПРОЕКТУ ПСР 1.2.423**

Категория проекта _____

Руководитель проекта,
заведующий научно-учебной
гидродинамической лабораторией
_____ Е.Е.Мешков
« ____ » _____ 2013г.

Содержание

1.Состояние работ на момент начала выполнения проекта.....	3
2.Цели проекта.....	5
3.Основные результаты проекта.....	6
4.Достигнутые целевые показатели проекта (количественные характеристики развития кафедры/факультета/института/НИЯУ).....	17
5.Результаты анализа рисков, возникших при выполнении проекта, и предложенных рекомендаций преодоления рисков.....	18
6.Результаты внедрения проекта с указанием подразделения- пользователя.....	19
7.Выводы и рекомендации.....	23
8.Литература.....	26
Приложение: Исходные материалы из отчетов исполнителей проекта в бумажном и/или электронном виде.	

1. Состояние работ на момент начала выполнения проекта.

В 2008 году в СарФТИ НИЯУ МИФИ была начата разработка методики моделирования газодинамических течений при помощи «атмосферной» ударной трубы, в которой в качестве драйвера использовалась энергия атмосферного воздуха [1,2]. В этой трубе давление атмосферного воздуха ($p_{ата}$) разгоняло в вакуумном канале поршень из полиэтилена длиной 4см до скорости ~ 30 м/с. Кинетическая энергия летящего поршня использовалась для приведения в движение системы поршней разной массы. В таких экспериментах можно было изучать процессы передачи энергии между поршнями и ее кумуляцию при столкновении поршней. В разработке методики экспериментов на «атмосферной» ударной трубе принимали участие студенты СарФТИ НИЯУ МИФИ [3-8]. В 2010 году был получен патент РФ на эту методику [9].

В 2011 году была начата разработка гидравлических моделей сходящейся цилиндрической ударной волны [10,11] и плоской ударной волны [12]. Эти модели основаны на использовании газогидравлической аналогии (метод «мелкой» воды) [13-16] В разработке принимали участие старшеклассники школ г.Сарова и студенты СарФТИ НИЯУ МИФИ.

Одновременно, с развитием этих лабораторных работ осуществлялось внедрение в практику методики численного моделирования с применением расчетного комплекса MASTER Proffessional [5,17]

Эти разработки имели своей целью решить проблему лабораторного практикума по газодинамике. Внедрение лабораторных работ в рамках университетских курсов газодинамики в практику обучения студентов является актуальной и вместе с тем трудноразрешимой задачей. Эти трудности имеют организационный характер и связаны с необходимостью использования в газодинамическом эксперименте опасных импульсных источников энергии (взрывчатые вещества, сжатые газы, электрический взрыв и т.д.). По этой причине лабораторные эксперименты на опасных установках производятся групповым методом, и студенты в этом случае

играют роль зрителей, не участвуя непосредственно в подготовке и проведении эксперимента. Эффективность такого метода проведения лабораторных работ не высока.

Это послужило толчком к разработке практикума по газодинамике, основанного на использовании «атмосферной» ударной трубы и газогидравлической аналогии. Все лабораторные работы практикума основаны на простых и безопасных экспериментах, что позволяет проводить их студентам без получения ими специальных допусков. Они могут быть использованы не только для проведения лабораторных работ, но и для проведения исследовательских работ силами студентов

Однако, комплектность этих лабораторных работ была недостаточна. До последнего времени развитие практикума осуществлялось за счет внутренних резервов СарФТИ НИЯУ МИФИ, не имея никаких источников финансирования. Экспериментальные установки для лабораторных работ имелись в одном экземпляре. Для проведения численных расчетов по программе MASTER Proffessional имелся только один компьютер. По этим причинам занятия со студентами производились групповым способом или в неполном объеме.

Осуществление проекта ПСР 1.2.423 позволило поднять состояние практикума по газодинамике на новый, качественно более высокий уровень.

2.Цели проекта.

1. Разработка набора лабораторных работ по газодинамике, не связанных с применением опасных источников энергии и основанных на использовании:
 - энергии атмосферного воздуха в качестве драйвера в лабораторных моделях;
 - газогидравлической аналогии;
 - методики регистрации газодинамических течений скоростной цифровой видеотехникой и обработки результатов экспериментов на ЭВМ;
 - численных расчетов простых одномерных газодинамических задач.
2. Внедрение в учебный процесс СарФТИ НИЯУ МИФИ разработанного лабораторного практикума по газодинамике.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА.

3.1. Разработка комплекса лабораторных работ.

3.1.1. Поршневая модель динамики простейшей термоядерной мишени.

Цель работы. Изучение динамики простейшей термоядерной мишени для инерционного термоядерного синтеза (ИТС).

Освоение методики регистрации течения скоростной цифровой камерой и обработки результатов регистрации.

Освоение методики расчетов простых одномерных газодинамических задач с применением расчетного комплекса MASTER Professional.

Инерционный термоядерный синтез (ИТС) является одним из основных направлений термоядерного синтеза – направление, в котором смесь дейтерия с тритием, нагретая в процессе сжатия схлопывающейся оболочкой, кратковременно удерживается в этом состоянии силами инерции (см. напр. [18,19]). При этом достижению зажигания термоядерного горючего препятствуют гидродинамические неустойчивости.

Данная лабораторная работа позволяет получить представления о динамике схлопывания простейшей термоядерной мишени на основе простой поршневой модели, являющейся одним из вариантов «атмосферной» ударной трубы, в которой используется энергия окружающего воздуха [9]. На рис.1. приведена фотография поршневой модели.

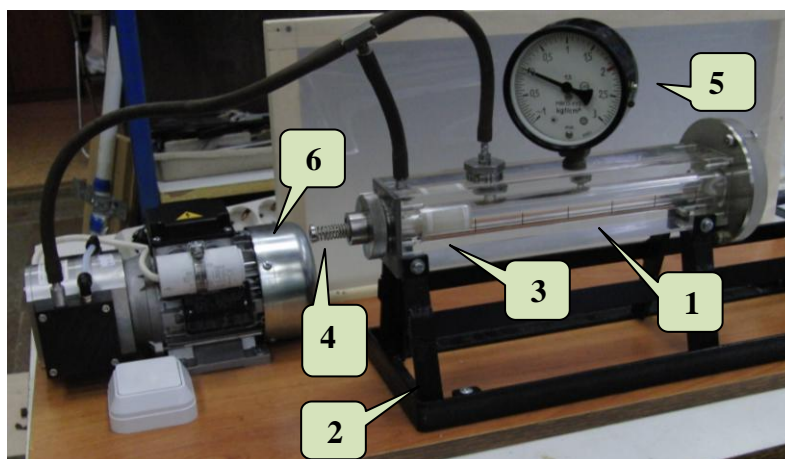


Рис.1. Общий вид поршневой модели термоядерной мишени. Обозначения: 1-канал; 2-подставка; 3-поршень из полиэтилена (длиной 4 см); 4-игла; 5-вакууметр; 6-вакуумный насос. На боковой поверхности канала нанесены риски с шагом 4см. Перед началом движения поршня расстояние от правой границы поршня до конца канала 23 см.

На рис.2 приведены кадры видеोगраммы эксперимента на поршневой модели.

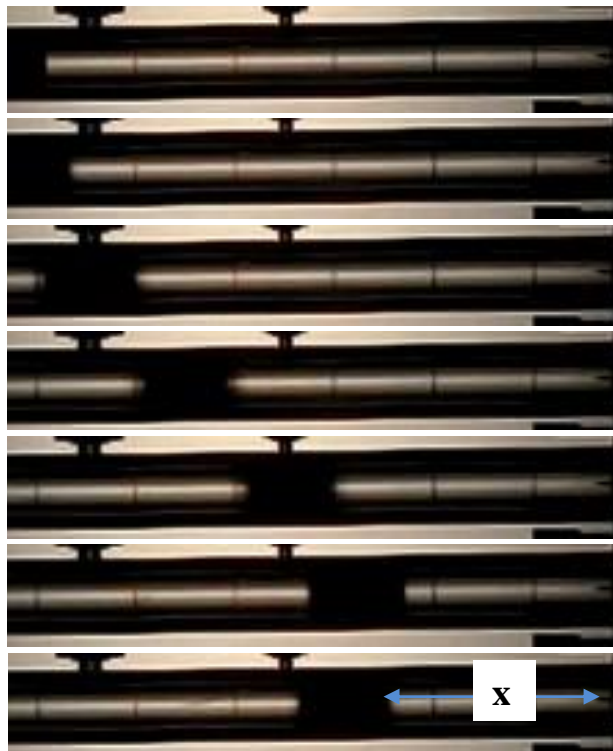


Рис.2.Разгон и торможение поршня при начальном давлении воздуха в канале 0.5атм. Временной интервал между кадрами 4 мс.

На рис.3. приведена X-t диаграмма поршня из полиэтилена длиной 4 см, ускоряемого давлением окружающего воздуха ($P_1=1\text{ата}$) и сжимающего воздуха в канале (начальное давление воздуха в канале $P_2=0,5\text{ата}$). Удовлетворительное согласие эксперимента с расчетом по программе MASTER Professional указывает на незначительное влияние посторонних эффектов (трения поршня о стенки канала, теплоотвод от сжимаемого газа в стенку) на результаты эксперимента.

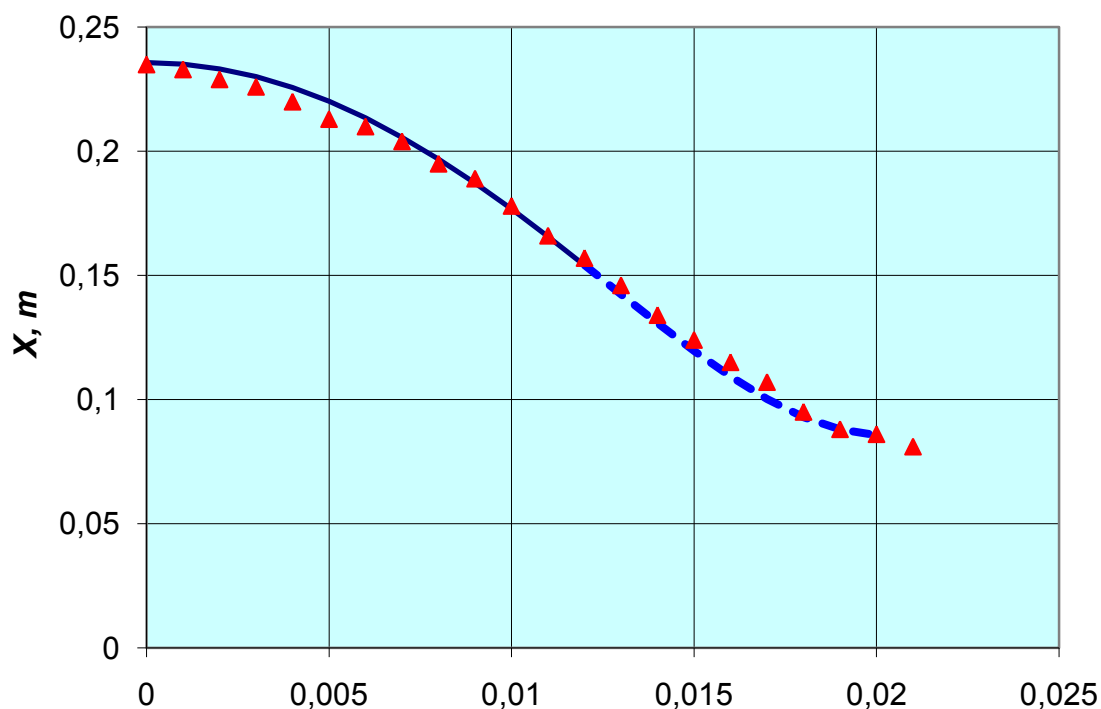


Рис.3. $X-t$ диаграмма внутренней границы поршня; результаты эксперимента сравниваются с расчетом по программе MASTER Professional (кривая). Часть кривой, выполненная штриховой линией, соответствует периоду торможения поршня давлением сжимаемого воздуха; на этой стадии граница поршня подвержена действию неустойчивости Рэля-Тейлора. Развитию неустойчивости препятствует прочность материала поршня.

Результаты расчета по программе MASTER Professional иллюстрируют не только динамику поршневой модели, но и масштаб кумуляции энергии сжимаемого в канале воздуха. Внутренняя энергия газа (и, соответственно, температура) в 1,5 раза (рис.4.).

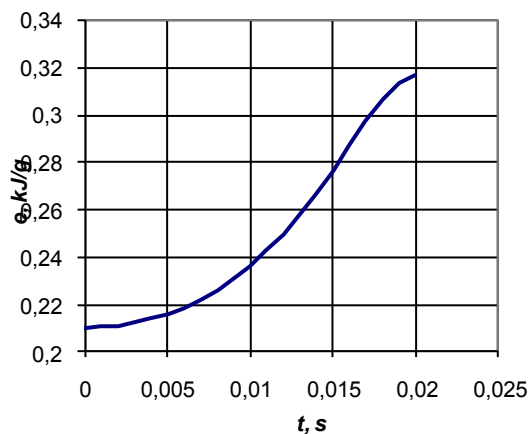


Рис.4. Зависимость от времени внутренней энергии сжимаемого газа

3.1.2. Гидравлическая модель плоской ударной волны.

Цель работы. Изучение стационарной ударной волны с применением лабораторной гидравлической модели – аналога простейшей ударной трубы. Освоение методики регистрации течения скоростной цифровой камерой и обработки результатов регистрации. Освоение методики численного расчета простых одномерных газодинамических задач.

При проведении работы студент знакомится с одним из базовых понятий газодинамики – понятием об стационарной ударной волне и о различии волновой и массовой скорости. Работа основана на применении газогидравлической аналогии (метод мелкой воды). В процессе проведения эксперимента студент осваивает методику регистрации течения при помощи цифровой скоростной видеотехники (фотоаппарат **Casio Exilim EX-ZR100** со скоростью съемки до 1000 кадров в секунду) и методики обработки результатов экспериментов на ЭВМ. Проведение эксперимента на гидравлической модели ударной трубы, демонстрирующей различие волновой и массовой скорости, сочетается с численным расчетом работы ударной трубы с применением расчетного комплекса **MASTER Professional**. На рис.5. приведен общий вид гидравлической модели плоской ударной волны.



Рис.5. Общий вид гидравлической модели плоской ударной волны. При выдергивании (вручную) плоской перегородки возникает течение, моделирующее течение при разрушении плотины в канале.

На рис.6. приведены кадры видеोगраммы эксперимента на гидравлической модели.

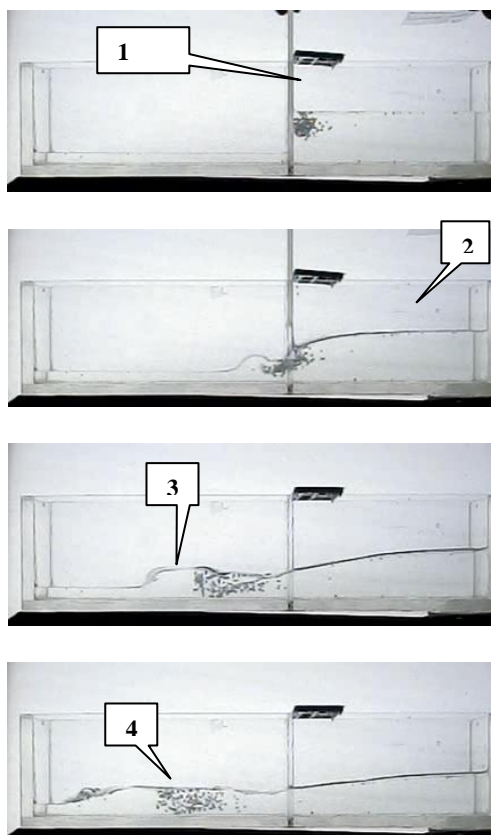


Рис.6. Течение в установке, моделирующей задачу о разрушении плотины. 1- плоская перегородка; 2- отсек с повышенным уровнем воды (бассейн), в воду добавлены частицы полистирола с плотностью, близкой к плотности воды; 3 – фронт волны (гидравлический скачок), 4 – фронт воды из бассейна с частицами полистирола.

На рис.7. приведены результаты измерения пути, пройденного фронтом гидравлического скачка (аналог фронта ударной волны) и пути фронта облака частиц полистирола.

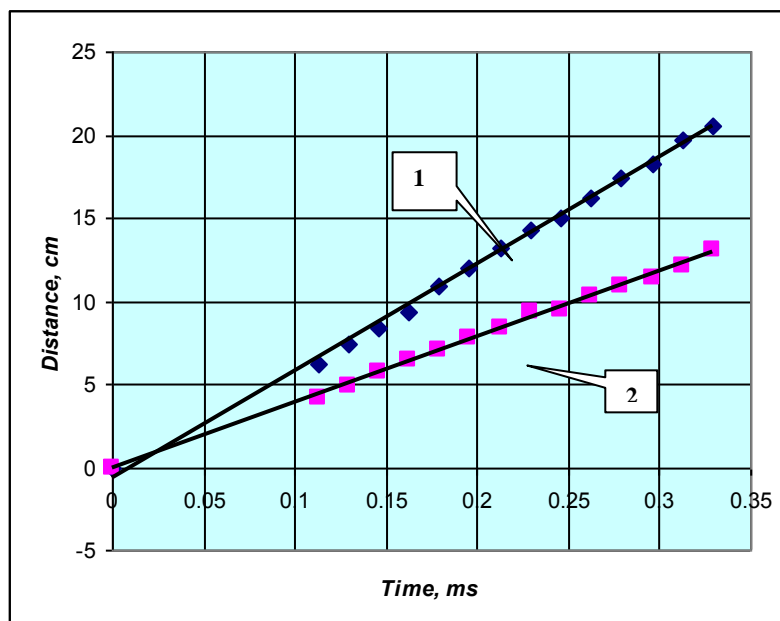


Рис.7. Результаты измерений зависимости от времени пути, пройденного фронтом волны (1) и фронтом частиц (2).

Результаты расчета течения в ударной трубе по программе MASTER Professional.

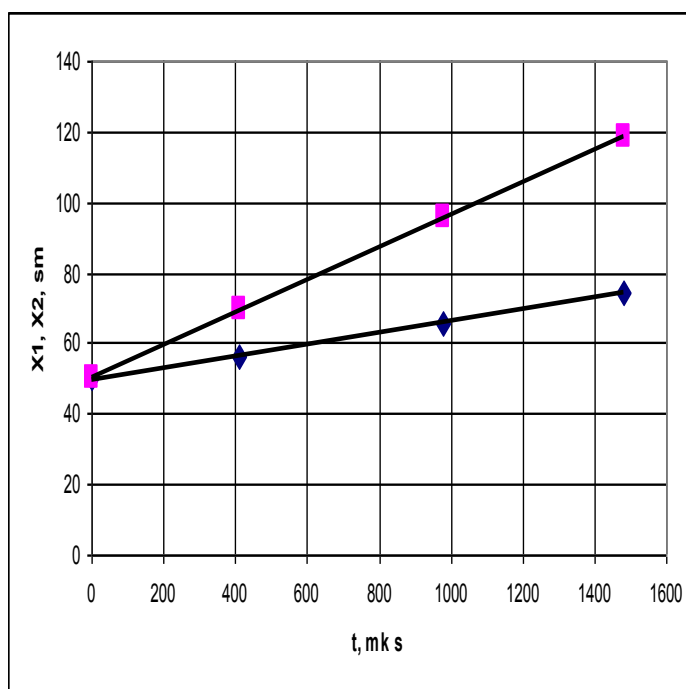


Рис.8. Результаты расчета течения в ударной трубе по программе MASTER Professional. Зависимость от времени пути, пройденного фронтом ударной волны ($X_1(t)$), и пути, пройденного разрывом плотности в области постоянного течения ($X_2(t)$).

Результаты модельного эксперимента и расчета демонстрируют различие волновой и массовой скорости в стационарной ударной волне.

3.1.3. Гидравлическая модель имплозии цилиндрической ударной волны.

Цель работы. Изучение процесса кумуляции сходящейся ударной волны на основе газогидравлической аналогии. Освоение методики регистрации течения скоростной цифровой камерой и обработки результатов регистрации. Освоение методики расчетов простых одномерных газодинамических задач.

При проведении работы студент знакомится с одним из базовых понятий газодинамики – понятием о кумуляции сходящейся ударной волны. Работа основана на применении газогидравлической аналогии (метод мелкой воды). В процессе проведения эксперимента студент осваивает методику регистрации течения при помощи цифровой скоростной видеотехники (фотоаппарат **Casio Exilim EX-ZR100** со скоростью съемки до 1000 кадров в секунду) и методики обработки результатов экспериментов на ЭВМ.

Проведение эксперимента на гидравлической модели, демонстрирующего процесс схождения и кумуляции цилиндрической ударной волны, сочетается с численным расчетом работы цилиндрической ударной трубы с применением расчетного комплекса **MASTER Professional**.

На рис.9. приведен общий вид гидравлической модели плоской ударной волны. При быстром подъеме цилиндрической перегородки формируется сходящийся цилиндрический гидравлический скачек – аналог сходящейся цилиндрической ударной волны.

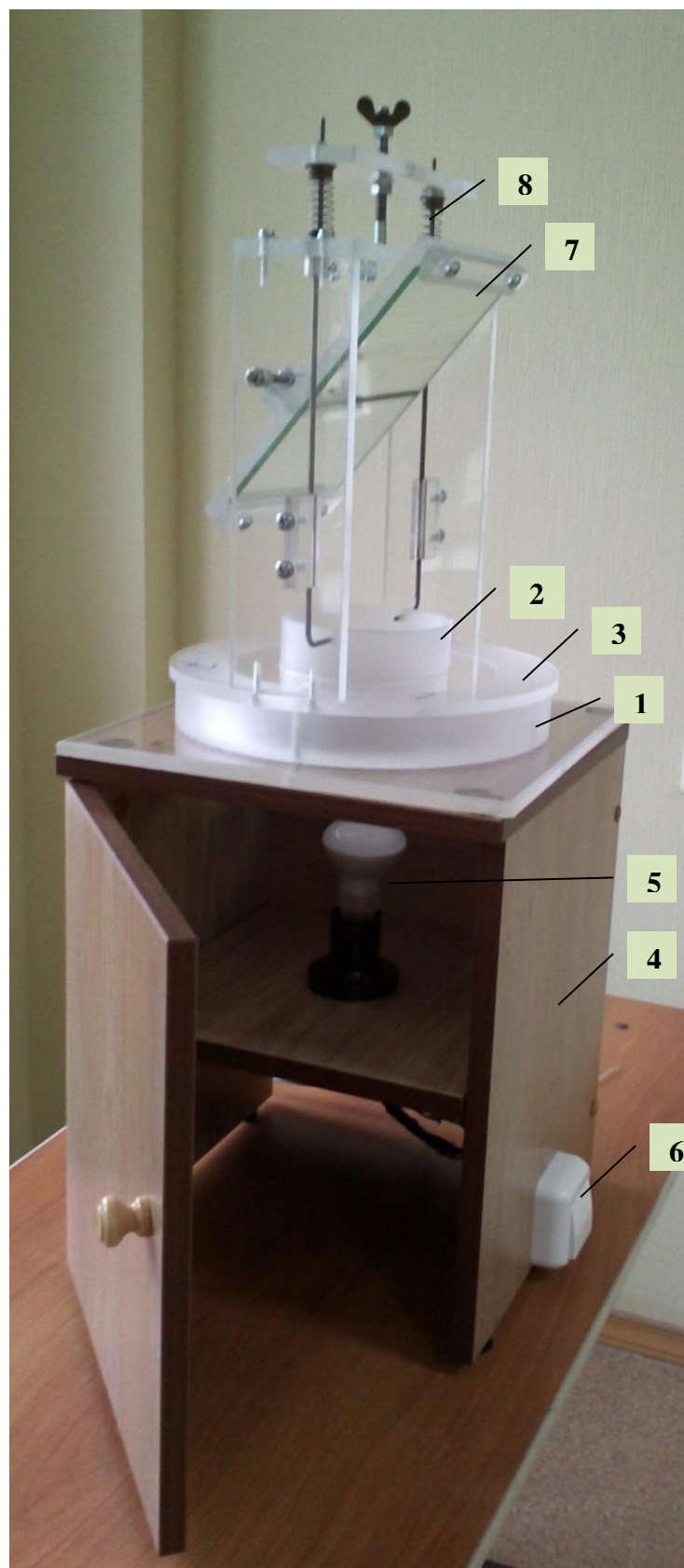


Рис.9. Фотография модели имплозии цилиндрической ударной волны. Обозначения: 1 – сосуд цилиндрической формы с плоским дном из оргстекла; 2 – подвижная перегородка цилиндрической формы; 3 – крышка сосуда из оргстекла; 4 – декоративная тумбочка с дверцей и отверстием в верхней крышке; 5 – источник света; 6 – выключатель электричества; 7 – зеркало; 8 – механизм для быстрого подъема перегородок.

На рис.10 приведены кадры видеогаммы сходящегося скачка. Вода внутри и вне цилиндрической перегородки была подкрашена чернилами разного цвета до полупрозрачного состояния; в результате визуализируется как граница воды из разных отсеков, так и сходящаяся цилиндрическая волна (поскольку толщина слоя окрашенной воды за фронтом больше). Эта волна является аналогом сходящейся цилиндрической ударной волны.

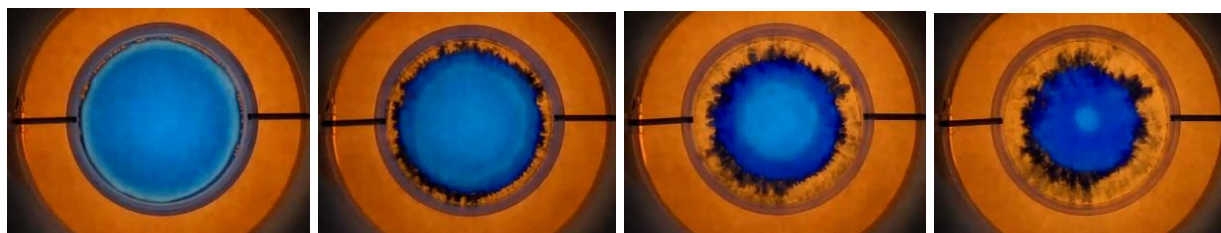


Рис.10. Кадры видеогаммы опыта ($h_1 > h_2 > 0$). Вода в стакане (h_2) была подкрашена синими чернилами, в остальной части (h_1) красными, в результате визуализируется не только граница разных объемов воды, но и фронт сходящейся волны.

На рис.11 приведена R-t диаграмма сходящейся волны, демонстрирующая ускорение волны по мере схождения.

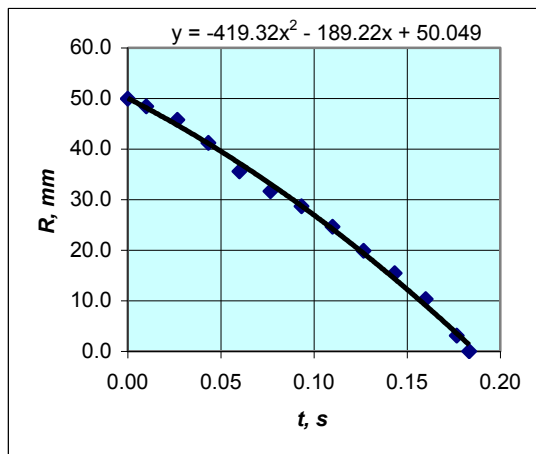


Рис.11. Зависимость радиуса R сходящейся волны от времени t .

На рис.12. приведены результаты расчета течения в ударной трубе по программе MASTER Professional в виде зависимости давления на фронте УВ от радиуса.

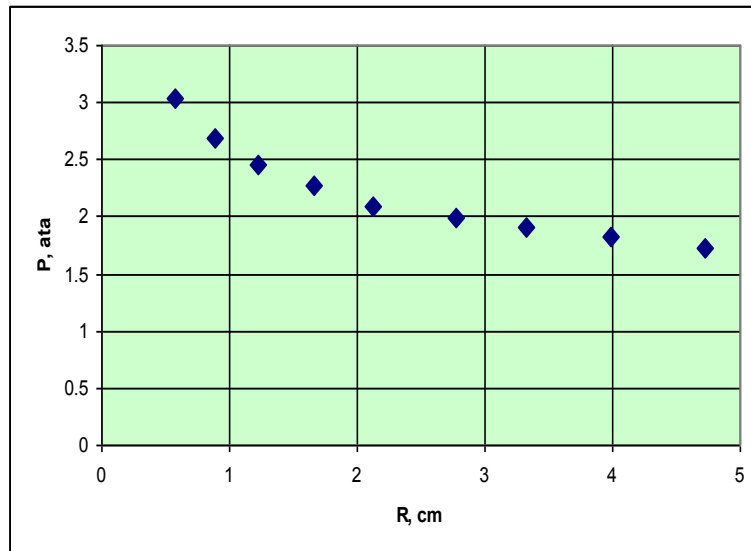


Рис.12. Результаты расчета течения в цилиндрической ударной трубе по программе MASTER Professional в виде зависимости давления на фронте УВ от радиуса.

Результаты эксперимента и расчета демонстрируют кумуляцию ударной волны – по мере уменьшения радиуса волны ее скорость и давление нарастают

3.1.4. В каждую из лабораторных работ для реального варианта входят следующие материалы:

1. Описание работы.
2. Инструкция по проведению эксперимента.
3. Инструкция по работе с фотоаппаратом **Casio Exilim EX-ZR100**.
4. Инструкция по обработке видеофайла с результатами эксперимента.
5. Инструкция по обработке результатов эксперимента в программе **EXEL**.
6. Пример обработки результатов эксперимента в программе **EXEL**.
7. Результат расчета задачи по программе **MASTER Professional**.
8. Инструкция по расчету по программе **MASTER Professional**.

3.1.5. В каждую из лабораторных работ для виртуального варианта входят следующие материалы:

1. Описание работы.
2. Видеофильм.
3. Набор результатов экспериментов (кадры видеogramм в формате **JPEG**).
4. Пример обработки результатов эксперимента в программе **EXCEL**.
5. Результат расчета по программе **MASTER Professional**.
6. Инструкция по расчету по программе **MASTER Professional**.

3.2. Разработка виртуального варианта комплекса лабораторных работ по газодинамике

3.2.1. Создание материально-технической базы для проведения лабораторных работ в режиме реального времени и в виртуальном варианте

Для создания материально-технической базы и проведения лабораторных работ в режиме реального времени и в виртуальном пространстве, было приобретено 5 компактных супер ЭВМ со следующей конфигурацией:

- Процессор Intel Core i7-3770K 3.5GHz/4core
- Оперативная память: DDR-III DIMM 16Gb
- Видеокарта 4Gb <PCI-E> DDR-5 Gigabyte <GeForce GTX680>
- Винчестер HDD 1 Tb SATA 6Gb/s Seagate Barracuda

Оборудование установлено в помещении №213 четвертого корпуса (МУКЦ) СарФТИ НИЯУ МИФИ. Оборудование было получено в конце октября 2013 г.

3.2.2. Монтаж, настройка и сопровождение.

На супер ЭВМ было установлено следующее программное обеспечение:

- Windows 7 (корпоративная)
- Пакет MSOffice
- Графический редактор Paint.NET
- Программа для редактирования видео файлов VirtualDub
- Проигрыватель видео файлов KMPlayer
- Комплект видеокодеков Xvid
- Программный комплекс MASTER Professional

Данная конфигурация оборудования и набор программного обеспечения позволяет выполнять лабораторные работы, визуализировать результаты экспериментов и производить расчет газодинамических течений.

Все компьютеры объединены в локальную сеть с возможностью выхода в Internet при помощи коммутатора D-Link DGS-1016D. Это позволит проводить лабораторные работы в режиме реального времени и в виртуальном пространстве.

4. Достигнутые целевые показатели проекта (количественные характеристики развития кафедры/факультета/института/НИЯУ).

В процессе отработки лабораторного практикума в течении ноября-декабря 2013г были проведены лабораторные работы для 4-х групп студентов кафедр:

- «Динамика и прочность машин» гр.ДП-59, ДП-31 (21 студент);
- «Приборостроение» гр.ПР-31 (9 студентов);
- «Квантовая электроника» гр.КЭ-40 (5 студентов).

В конце октября была проведена лабораторная работа для группы сотрудников ВНИИЭФ в рамках факультета повышения квалификации (6 человек).

5. Результаты анализа рисков, возникших при выполнении проекта, и предложенных рекомендаций преодоления рисков.

1. Выход из строя оборудования.

Рекомендации по устранению рисков:

- Необходимо приобрести бесперебойные источники питания для защиты от скачков напряжения и временного отключения электрической энергии.
- Установка антивирусных программ для защиты информации и программного обеспечения от воздействия вирусных атак.

2. Предполагаемое развитие и существенное расширение лабораторного практикума по газодинамике ставит вопрос о необходимости увеличения персонала, обслуживающего систематическое проведение лабораторных работ и соответствующего финансирования.

Рекомендации по устранению рисков:

- Как показывает опыт обучения старших курсов физико-технического факультета СарФТИ НИЯУ МИФИ, студенты успешно справляются с функцией обслуживания процесса проведения лабораторных работ. Поэтому необходимо принять меры к увеличению числа таких студентов.
- В процессе разработки практикума в течении 2008-2012 гг ряд студентов СарФТИ НИЯУ МИФИ приобрели необходимый опыт в проведении лабораторных работ, но в настоящее время эти студенты, успешно закончившие институт, стали сотрудниками ВНИИЭФ. В связи с этим необходимо договориться с ВНИИЭФ в рамках существующего соглашения о возможности откомандирования на короткие сроки (несколько часов) таких сотрудников в СарФТИ НИЯУ МИФИ на время проведения тех или иных лабораторных работ практикума по газодинамике.

6. Результаты внедрения проекта с указанием подразделения-пользователя.

С 2011 г в научно-учебной гидродинамической лаборатории СарФТИ НИЯУ МИФИ в практику учебного процесса института начинают развиваться и внедряться лабораторные работы по газодинамике.

В 2011-2012 гг лабораторные работы для студентов проводились эпизодически групповым методом на обрабатываемых моделях.

Одна из лабораторных работ комплекса была успешно использована в Экспресс – Проекте «Кумуляция в гидродинамике» в рамках Всероссийского Детского Научно-Технического Фестиваля «РОСАТОМА» (рис.13,14).



Рис.13,14. Проведение в СарФТИ НИЯУ МИФИ эксперимента на гидравлической модели сходящейся цилиндрической ударной волны и сопровождающего его численного расчета во время Всероссийского Детского Научно-Технического Фестиваля «РОСАТОМА» в феврале 2012г

В процессе подготовки к Фестивалю было изготовлено 9 установок для лабораторной работы «Гидравлическая модель сходящейся цилиндрической ударной волны». Это позволило начать проведение занятий в режиме, когда работу на установке проводят 2-3 студента. Как показывает опыт, такой режим является оптимальным. В 2013 г работа по цилиндрической имплозии проводилась несколько раз. Следует заметить, что до последнего времени обработка результатов лабораторных работ проводилась на списанных компьютерах

В 2013 году в рамках проекта ПСР 1.2.423 для создания материально-технической базы и проведения лабораторных работ в режиме реального времени и в виртуальном пространстве, было приобретено 5 компактных супер ЭВМ со следующей конфигурацией:

- Процессор Intel Core i7-3770K 3.5GHz/4core
- Оперативная память: DDR-III DIMM 16Gb
- Видеокарта 4Gb <PCI-E> DDR-5 Gigabyte <GeForce GTX680>
- Винчестер HDD 1 Tb SATA 6Gb/s Seagate Barracuda

Оборудование установлено в помещении №213 четвертого корпуса (МУКЦ) СарФТИ НИЯУ МИФИ (рис.15). Оборудование было получено в конце октября 2013 г.



Рис.15. Общий вид помещения для проведения лабораторных работ (30 октября 2013).

На супер ЭВМ было установлено следующее программное обеспечение:

- Windows 7 (корпоративная)
- Пакет MSOffice
- Графический редактор Paint.NET
- Программа для редактирования видео файлов VirtualDub
- Проигрыватель видео файлов KMPlayer
- Комплект видеокодеков Xvid

- Программный комплекс MASTER Professional
- Антивирус Касперского 6.04

Данная конфигурация оборудования и набор программного обеспечения позволяет выполнять лабораторные работы, визуализировать результаты экспериментов и производить расчет газодинамических течений.

Все компьютеры объединены в локальную сеть с возможностью выхода в Internet при помощи коммутатора D-Link DGS-1016D. Это позволит проводить лабораторные работы как в режиме реального времени, так и в виртуальном пространстве.

В течение ноября – декабря 2013 г в процессе отработки комплекса лабораторных работ были проведены лабораторные работы:

1. 29.11.13г. «Поршневая модель динамики простейшей термоядерной мишени» гр. ДП-59, 11 студентов;
2. 02.12.13г. «Поршневая модель динамики простейшей термоядерной мишени» гр. КЭ-40, 5 студентов;
3. 06.12.13г. «Поршневая модель динамики простейшей термоядерной мишени» гр. КЭ-40, 5 студентов;
4. 11.12.13. «Гидравлическая модель плоской УВ» гр. ДП-31, 10 студентов.
5. 12.12.13г. «Гидравлическая модель имплозии цилиндрической УВ» гр. ДП-31, 10 студентов;
6. 13.12.13г. «Гидравлическая модель плоской УВ» гр. ПР-31, 9 студентов.

Комплекс лабораторных работ по газодинамике может быть использован не только для обучения студентов, но и сотрудников ВНИИЭФ в рамках факультета повышения квалификации. 31.10.13г. была проведена лабораторная работа «Гидравлическая модель имплозии цилиндрической УВ» для группы сотрудников ВНИИЭФ(6 человек) (рис.16,17,18).



Рис.16. Проведение лабораторной работы по имплозии цилиндрической ударной волны студентами СарФТИ НИЯУ МИФИ.



Рис.17,18.Проведение лабораторной работы по цилиндрической имплозии сотрудниками ВНИИЭФ (факультет повышения квалификации).

В заключение следует заметить, что комплекс лабораторных работ по газодинамике может представлять интерес не только для СарФТИ НИЯУ МИФИ, но и для других ВУЗов. Доклад о комплексе на Международной Школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики», (Евпатория, июнь 2013г) [20] вызвал большой интерес у слушателей (сотрудники МГУ, ЦАГИ и др ВУЗов). Точно также была воспринята с интересом информация о комплексе в Нагойском и Осакском Университетах во время поездки Е.Мешкова в Японию в марте 2013 г.

7. Выводы и рекомендации

1. В СарФТИ НИЯУ МИФИ в рамках лабораторного практикума по газодинамике разработаны три лабораторных работы:
 - Поршневая модель простейшей термоядерной мишени.
 - Гидравлическая модель плоской стационарной ударной волны.
 - Гидравлическая модель имплозии цилиндрической ударной волны.Эти работы могут выполняться в реальном и виртуальном варианте.
2. Все модели основаны на простых и безопасных экспериментах (использование энергии атмосферного воздуха, газогидравлическая аналогия). Это позволяет студентам самим проводить лабораторные работы непосредственно, без получения специальных допусков.
3. Использование практикума в учебном процессе существенно повышает эффективность усвоения ключевых понятий газодинамики (ударная волна, имплозия, кумуляция и др.).
4. В процессе выполнения лабораторных работ студенты приобретают навыки
 - работы со скоростной видеотехникой и обработки результатов экспериментов на ЭВМ.
 - численного моделирования с применением программного комплекса MASTER Professional простых одномерных газодинамических задач.
5. Установки для лабораторных работ могут быть использованы не только для проведения работ в рамках лабораторных практикумов по газодинамике, но и для проведения исследовательских работ силами студентов
6. Разработанный комплекс из трех лабораторных работ внедряется в учебный процесс СарФТИ НИЯУ МИФИ. Практический опыт его использования даже в урезанном виде демонстрирует его

привлекательность для студентов и эффективность и поэтому может и должна продолжаться работа по его развитию. В частности, комплекс может быть расширен за счет новых работ, основанных на использовании энергии атмосферного воздуха:

- Откол.
- Кумуляция энергии при столкновении плоских слоев.
- Неустойчивость Рэлея-Тейлора [21,22].
- Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова [23,24].

Возможно развитие гидравлической модели плоской ударной волны (моделирование процесса сжатия ударной волной и расширение в волне разрежения) [25].

Эти работы могут быть использованы в учебном процессе как в реальном, так и в виртуальном варианте. Следует заметить, что использование ИНТЕРНЕТа существенно расширяет круг пользователей практикума. Однако не надо забывать, что эффективность виртуального варианта лабораторных работ заметно ниже по сравнению с «ручным» проведением работы в реальном варианте. Несомненно, что виртуальный вариант работы способствует более эффективному усвоению изучаемого материала, но реальный вариант дает **дополнительно практический опыт** проведения газодинамического эксперимента.

В то же время возможно развитие и расширение виртуального варианта разрабатываемого практикума за счет работ, которые не могут выполняться студентами «вручную» по разным причинам (использование в работе опасного источника энергии, уникальность и/или высокая стоимость установки, существующей в одном экземпляре и т.п.). Виртуальный вариант практикума может быть использован для ускорения внедрения в практику исследований ВНИИЭФ новейших методических разработок. В качестве примера можно привести метод PDV – метод, позволяющий производить

непрерывную регистрацию скорости не только одного, но и ряда летящих объектов. Причем эти объекты могут иметь микроскопические размеры!

7. Комплекс лабораторных работ по газодинамике может представлять интерес не только для СарФТИ НИЯУ МИФИ, но и для других ВУЗов. Доклад о комплексе на Международной Школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики», (Евпатория, июнь 2013г) [20] вызвал большой интерес у слушателей (сотрудники МГУ, ЦАГИ и др ВУЗов). Точно также была воспринята с интересом информация о комплексе в Нагойском и Осацком Университетах во время поездки Е.Мешкова в Японию в марте 2013 г.

Из этого можно сделать вывод о возможности распространения на коммерческой основе практикума в других ВУЗах РФ. Для этого в СарФТИ НИЯУ МИФИ имеется как производственная база, так и юридическая (имеется патент РФ на способ и устройства, реализующие принцип использования энергии атмосферного воздуха [9]). Для реализации этого процесса возможно создание малого предприятия на базе СарФТИ НИЯУ МИФИ.

Не исключена также возможность распространения практикума на международном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мешков.Е.Е** Комплекс лабораторных работ по газодинамике на основе атмосферной ударной трубы //Отчет –предложение, ФГОУ ВПО СарФТИ, Инв. №24, 2008г.
2. **Мешков Е.Е., Савицкий Д.О.**, Лабораторная модель для изучения неустойчивости Рэлея-Тейлора // Вестник Саровского Физтеха №15,2008, с. 146-149.
3. **А.Ю. Вишняков, Н.В. Мелешкин, И.А. Юрина.** Расчетная схема атмосферной ударной трубы для изучения процессов кумуляции энергии.// Сб. аннотаций конференции «Научная сессия МИФИ 2009» т.1 «Ядерная физика и энергетика» М., 2009., с. 160.
4. **Ю.П. Щербак, В.В. Алексеев, А.И. Логвинов, Е.Е. Мешков, В.В. Руденко, А.Г. Сироткина, Г.В. Тачаев.** Разработка и внедрение в СарФТИ комплекса экспериментально-расчетного моделирования для изучения проблем нестационарной газодинамики // Сб. аннотаций конференции «Научная сессия МИФИ 2009» т.1 «Ядерная физика и энергетика» М., 2009., с.155.
5. **В.В. Руденко, М.В.Шабуров, Е.Е. Мешков.** Программный комплекс MASTER PROFESSIONAL-интегрированная среда визуального компьютерного моделирования процессов физики сплошных сред.// Сб. аннотаций конференции «Научная сессия МИФИ 2009» т.1 «Ядерная физика и энергетика» М., 2009., с.156
6. **Вишняков А.Ю., Мелешкин Н.В., Сюндюков А.Ю., Юрина И.А.** Расчетная и экспериментальная проверка работоспособности атмосферной ударной трубы.// Сб. материалов 3 Всероссийской молодежной научно – инновационной школы «Математика и математическое моделирование». СарФТИ., 2009., с. 62.
7. **Вишняков А.Ю., Мелешкин Н.В., Сюндюков А.Ю., Юрина И.А.** Расчетная и экспериментальная проверка работоспособности атмосферной ударной трубы. //Форум «Современные инновационные технологии в промышленности» Нижний Новгород, 16 апреля 2009г.
8. **Ю. В. Алеханов, Г.Б. Красовский, С. А. Ломтев, Е. Е. Мешков, А.Д. Шамишн.** Лабораторная модель для изучения неустойчивостей Рэлея-Тейлора. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011. Сб. аннотаций докладов. Том 3. 2011 г. стр. 268
9. **Мешков Е.Е, Красовский Г.Б.** Способ лабораторного моделирования задач газодинамики и устройство для его осуществления (варианты). // Патент РФ № 2393546 от 27.06.2010
10. **А.Б. Георгиевская, Г.Б.Красовский, Е.Е. Мешков, Л.Л Огородников.** Лабораторная модель цилиндрической имплозии. // Сб. аннотаций Научной Сессии НИЯУ МИФИ 2012. Т.3, с.104.
11. **Georgievskaya A.B., Krasovsky G.B., Meshkov E.E., Ogorodnikov L.L., Tochilina A.A.** Hydrodynamic Models of Plane and Converging Cylindrical Shock Waves. // Book of Abstracts, IUTAM symposium 12-3 “Waves In Fluids: Effects Of Non-Linearity, Rotation, Stratification And Dissipation”. Moscow, June 18-22, 2012, p. 81.
12. **В.М.Бельский, Е.Е.Мешков, А.А.Точилина.** Модель ударной волны.// Сб. аннотаций Научной Сессии НИЯУ МИФИ 2012. Т.3, с.105.
13. **Стокер Дж.Дж.** Волны на воде. Математическая теория и приложения. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 617 с.
14. **Н.Н. Сунцов,** Методы аналогий в аэрогидродинамике. М., Физматгиз, 1958

15. Распространение и отражение гидравлического прыжка. Задача практикума по механике. Под редакцией академика РАН Е.И.Шемякина. Изд-во МГУ, 2005, 35 стр.
16. **С.В.Богомолов, Е.В.Захаров, С.В.Зеркаль.** Моделирование волн на мелкой воде методом частиц // Математическое моделирование. Т.14. №3. С.103-116, 2003
17. **Руденко В.В., Шабуров М.В.** Учебно-исследовательский комплекс MASTER Professional Ver. 1.0. // Свидетельство об отраслевой регистрации разработки. №11845, 2008г
18. **Баско М.М., Шарков Б.Ю., Забродин А.В., Гуськов С.Ю., Диденко А.Н., Имиенник В.С., Кошкарев Д.Г., Масленников М.В., Медин С.А., Недосеев С.Л., Смирнов В.П., Субботин В.И., Феоктистов Л.П., Харитонов В.В., Чуразов М.Д.** Ядерный синтез с инерционным удержанием: современное состояние и перспективы для энергетики. //Физматлит, 2005, с.255
(http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_60753/).
19. **Гаранин С.Г.** Концепция построения лазерной установки мегаджоульного уровня.
<http://www.myshared.ru/slide/283958/>
20. **Е.Е.Мешков, В.В.Руденко.** Комплекс лабораторных работ по газодинамике. // Материалы Тринадцатой Международной Школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 4-13 июня 2013 г., с.146-147.
21. **Lord Rayleigh** //Proc.London Math Soc. V.14, . 1883. P.70.
22. **Taylor G.I.** The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes.I. // Proc.Roy.Soc. V.A201, . 1950, p.192.
23. **Richtmyer R.D.** Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Comm. Pure and Applied Math. 1960. Vol. 13. P.279
24. **Мешков Е.Е.** Неустойчивость границы двух газов, ускоряемой ударной волной. // Механика жидкости и газа. №5 1969. с.151
25. **Барышев А.С., Георгиевская А.Б., Замыслов Д.Н., Комраков В.А., Логвинов А.С., Мешков Е.Е.** Устройство для моделирования ударной волны и волны разрежения. Заявка на патент РФ на полезную модель (была направлена в патентное бюро НИЯУ МИФИ в августе 2013 г)