

Модель динамики термоядерной мишени

*Александр Сергеевич Барышев, Дмитрий Николаевич Замыслов,
Евгений Евграфович Мешков, Ирина Александровна Новикова,
Валерий Викторович Пичугов, Владимир Викторович Руденко*,
Геннадий Михайлович Янбаев*

*Саровский Физико-Технический Институт НИЯУ «МИФИ», Саров
*ВНИИ Экспериментальной Физики, Саров
meshkov@sarfti.ru, eemeshkov@gmail.com*

В рамках лабораторного практикума по газодинамике, создаваемого в СарФТИ НИЯУ МИФИ, разработана модель динамики простейшей термоядерной мишени для ИТС. В модели в качестве драйвера используется внутренняя энергия воздуха в окружающей среде. В силу безопасности модели работа с ним не требует специальных допусков.

Ключевые слова: практикум по газодинамике, динамика термоядерной мишени, ИТС, «атмосферная» ударная труба, эксперимент, численный расчет.

Введение

Внедрение лабораторных работ в рамках университетских курсов газодинамики в практику обучения студентов является актуальной и вместе с тем трудноразрешимой задачей. 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.).

В научно-учебной гидродинамической лаборатории СарФТИ НИЯУ МИФИ в настоящее время разрабатывается лабораторный практикум по газодинамике [1] на основе применения «атмосферной» ударной трубы, в которой в качестве источника энергии используется энергия окружающего воздуха, [2] и газогидравлической аналогии (метод «мелкой воды») [3]. Все лабораторные работы основаны на простых и безопасных экспериментах, что позволяет студентам проводить их без получения специальных допусков.

Одна из лабораторных работ практикума позволяет получить представления о динамике простейшей термоядерной мишени для инерционного термоядерного синтеза (ИТС) на основе поршневой модели, являющейся одним из вариантов «атмосферной» ударной трубы [2].

В ИТС смесь дейтерия с тритием, нагретая в процессе сжатия схлопывающейся оболочкой термоядерной мишени, кратковременно удерживается в этом состоянии силами инерции (см. напр. [4,5]). При этом достижению зажигания термоядерного

горючего препятствуют гидродинамические неустойчивости, и, в частности, *неустойчивость Рэля-Тейлора* (или *гравитационная неустойчивость*) [6-10].

Простейшая термоядерная мишень для ИТС это замкнутая сферическая тонкостенная оболочка (рис. 1а), заполненная смесью дейтерия Д и трития Т. Под действием мощного лазерного импульса она схлопывается и сжимает ДТ смесь. Качественная $R-t$ диаграмма сжатия смеси приведена на рис.1,б.

До момента времени t_1 , внутренняя граница оболочки движется по радиусу с ускорением, но под действием нарастающего давления сжимаемого ДТ газа, начиная с момента времени t_1 , граница движется с торможением вплоть до остановки (t_2) и начала обратного движения.

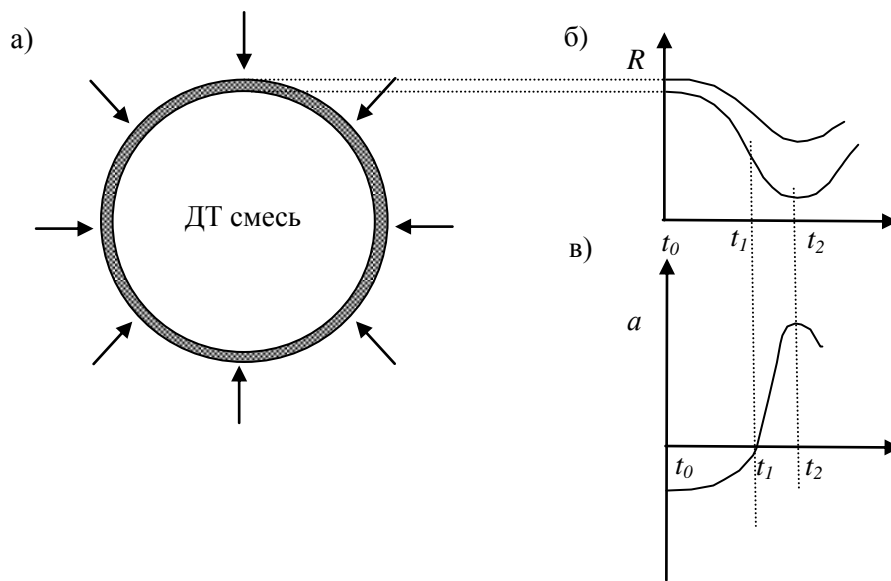


Рисунок 1. а)Схема простейшей сферической термоядерной мишени, нагружаемой лазерным импульсом. б)Качественная $R-t$ диаграмма схлопывания оболочки мишени. в)Качественная зависимость от времени ускорения внутренней границы оболочки мишени $a(t)$.

В интервале времен $t_0 \div t_1$ внутренняя граница оболочки устойчива, поскольку ускорение направлено от среды с большой плотностью (материал оболочки) к среде с малой плотностью (ДТ смесь), а в интервале $t_1 \div t_2$ ускорение меняет знак и на этой границе развивается неустойчивость Рэля-Тейлора.

Поршневая модель термоядерной мишени

Схема модели, иллюстрирующей динамику схлопывания оболочки термоядерной мишени, приведена на рис. 2.

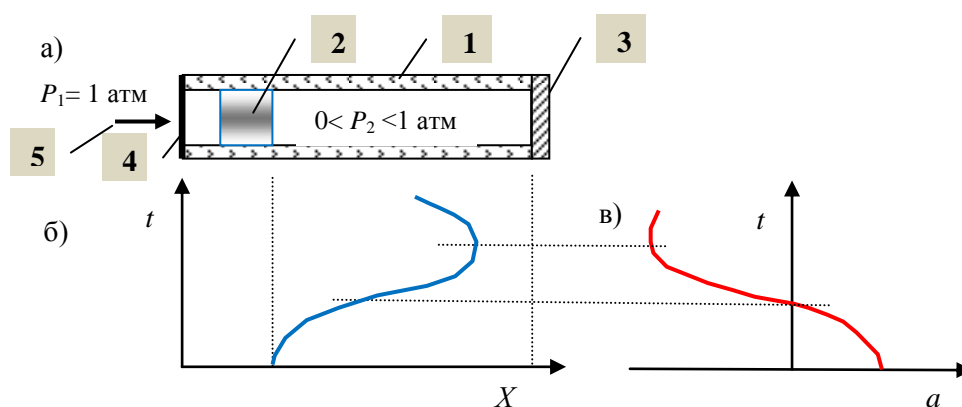


Рисунок 2. а)Схема плоской модели термоядерной мишени. 1-цилиндрический канал, вакуумированный до давления P_2 ($0 < P_2 < 1$ атм); 2-поршень; 3-заглушка; 4-диафрагма; 5-игла для пробоя диафрагмы. б)Качественная $X-t$ диаграмма внутренней границы поршня, ускоряемого атмосферным давлением после разрушения диафрагмы, инициированного пробоем иглой. в)Качественная зависимость $a(t)$ ускорения поршня от времени.

В качестве такой модели выступает ускорительный канал атмосферной ударной трубы – цилиндрический канал (1), заглушенный с одного конца (3) и закрытый диафрагмой (4) с другого конца. В начале канала помещен поршень (2). Внутренний объем канала вакуумирован до давления $0 < P_2 < 1$ атм. После пробоя диафрагмы иглой (5) поршень начинает двигаться внутрь канала с ускорением под действием перепада давления $\Delta P = P_1 - P_2$ (снаружи канала атмосферное давление окружающего воздуха P_1). В процессе движения поршня воздух в канале сжимается; его давление растет и в определенный момент поршень начинает тормозиться этим нарастающим давлением вплоть до полной остановки и разворота движения.

Изменение ускорения a поршня иллюстрируется графиком рис.2,в. В начале движения ускорение максимально и оно направлено в направлении движения поршня. Но сразу же ускорение начинает уменьшаться вследствие уменьшения разности

давлений на торцах поршня. Ускорение уменьшается до нуля и затем меняет знак на обратный. И таким образом динамика поршня в этой схеме аналогична динамике схлопывания оболочки термоядерной мишени.

Общий вид лабораторной установки приведен на рис.3. В этой установке был использован фрагмент устройства для лабораторной работы по изучению кумуляции энергии при соударении плоских слоев [11-13]. Канал из оргстекла (1) установлен на подставке (2). В начале канала (1) установлен поршень (3). На входе в канал (1) установлена диафрагма, отделяющая канал от окружающей атмосферы, и игла (4) для пробы диафрагмы. Конец канала заглушен. На корпусе канала установлен вакуумметр (5).

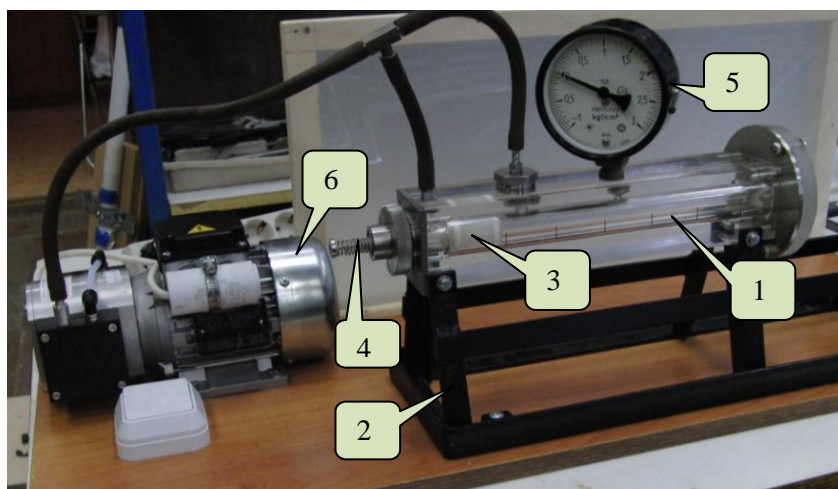


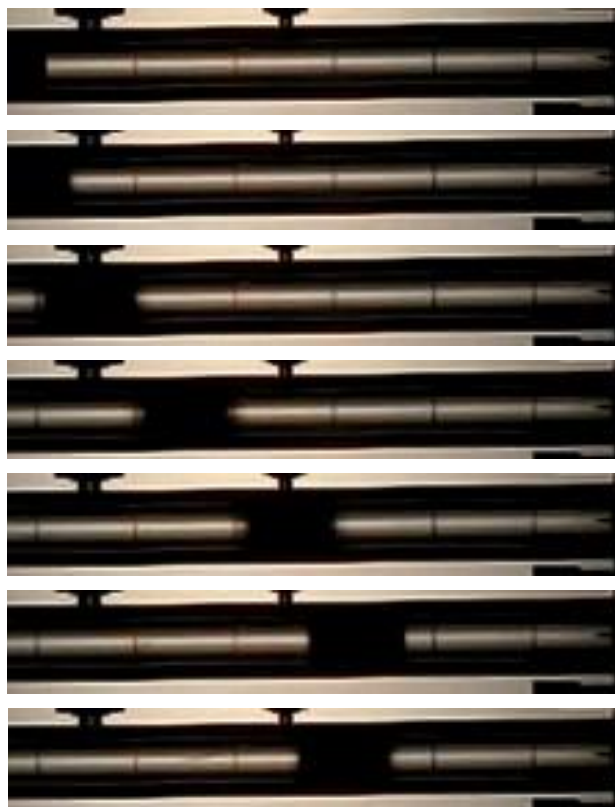
Рисунок 3. Общий вид поршневой модели термоядерной мишени. Обозначения: 1-канал; 2-подставка; 3-поршень из полиэтилена (длиной 4 см); 4-игла; 5-вакуумметр; 6-вакуумный насос. На боковой поверхности канала нанесены риски с шагом 4см. Перед началом движения поршня расстояние от правой границы поршня до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

При проведении эксперимента давление воздуха канала (1) понижается до заданного давления P_2 . Давление определяется вакуумметром (5). Затем производится пробой диафрагмы иглой. Регистрация процесса ускорения и торможения поршня осуществляется цифровым фотоаппаратом **Casio Exilim EX-ZR100** в режиме

видеосъемки с частотой 1000 кадров в сек. Для подсветки используется мощный источник света.

Работа поршневой модели. Эксперимент и численный расчет

На рис.4 приведены кадры видеोगраммы разгона и торможения поршня из полиэтилена длиной 4см в канале установки. Начальное давление воздуха в канале $P_2=0,5$ атм. На рис.5 приведена $X-t$ диаграмма внутренней границы поршня – результаты эксперимента и расчета по программе **MASTER Professional** [14].



← X →

Рисунок 4. Кадры скоростной видеोगраммы разгона и торможения поршня при начальном давлении воздуха в канале $P_2 = 0.5$ атм. Временной интервал между кадрами 4 мс.

Результаты эксперимента и расчета иллюстрируют характер динамики внутренней границы термоядерной мишени в процессе ее схлопывания. Расчет по

программе **MASTER Professional** позволяет получать не только $X-t$ диаграмму, но и другие характеристики динамики поршня: скорость $U(t)$ (рис.6) и ускорение $a(t)$ (рис.7), а также параметры состояния сжимаемого поршнем воздуха – давление $P(t)$ (рис.8), плотность $\rho(t)$ (рис.9), удельную внутреннюю энергию $e(t)$ (рис.10).

Достижимые значения максимального давления, плотности и внутренней энергии значительно превосходят не только начальные значения для сжимаемого воздуха, но и воздуха в окружающей среде. Эти обстоятельства иллюстрируют процесс кумуляции энергии в модели – *процесс накопления кинетической энергии при движении поршня и трансформацию этой энергии во внутреннюю энергию сжимаемого газа*. В результате нарастает плотность энергии сжимаемого газа.

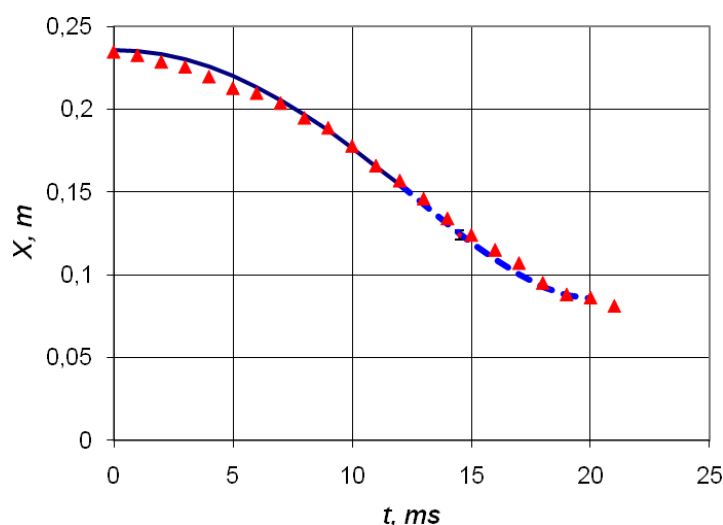


Рисунок 5. $X-t$ диаграмма внутренней границы поршня; результаты эксперимента сравниваются с расчетом по программе **MASTER Professional** (кривая). Часть кривой, выполненная штриховой линией, соответствует периоду торможения поршня давлением сжимаемого воздуха; на этой стадии граница поршня подвержена действию неустойчивости Рэлея-Тейлора. Развитию неустойчивости препятствует прочность материала поршня.

Таким же образом происходит процесс трансформации энергии в термоядерной мишени, но в несравненно больших масштабах.

С другой стороны, хорошее согласие расчета и экспериментальных данных указывает на слабое влияние таких факторов как трение поршня о стенки канала и

потери тепла в стенки на процесс сжатия воздуха (т.е. процесс сжатия воздуха в канале является практически адиабатическим).

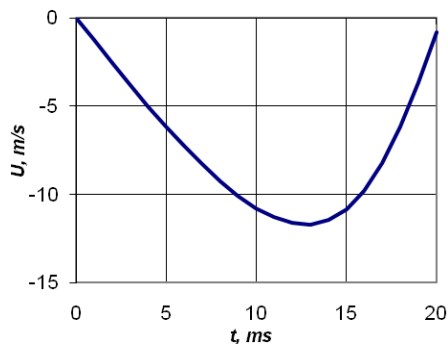


Рисунок 6. Зависимость скорости поршня от времени

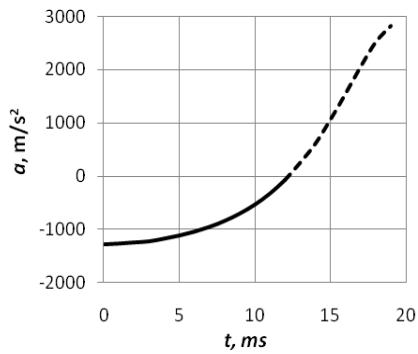


Рисунок 7. Зависимость ускорения поршня от времени

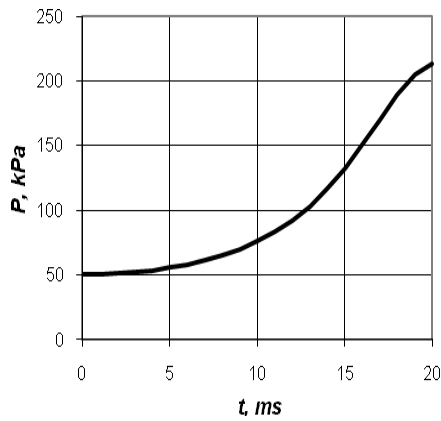


Рисунок 8. Зависимость давления сжимаемого газа от времени

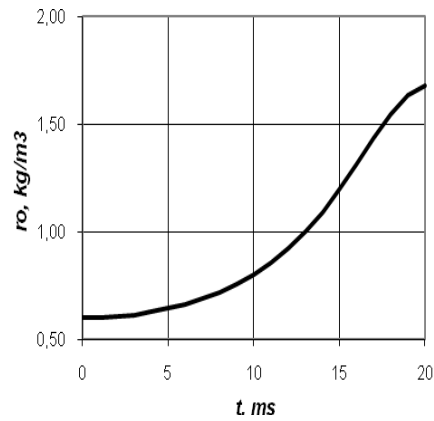


Рисунок 9. Зависимость плотности сжимаемого газа от времени

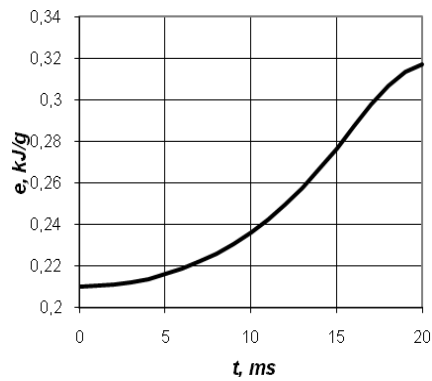


Рисунок 10. Зависимость внутренней энергии сжимаемого газа от времени

На зависимости ускорения от времени (рис.7) показан временной интервал (штриховая часть кривой), когда ускорение направлено от сжимаемого воздуха (менее плотная среда) к поршню (более плотная среда); на этом интервале внутренняя граница поршня подвержена действию неустойчивости Рэлея-Тейлора. В нашем случае прочность материала поршня препятствует развитию неустойчивости, но при схлопывании термоядерной мишени масштаб сил, приводящих в движение оболочку мишени, многократно превосходит масштаб прочности материала оболочки; к тому же вследствие действия сверхвысоких температур материал оболочки теряет прочность.

При выполнении описанной работы и других работ практикума студенты приобретают навыки проведения экспериментов с применением цифровой видеотехники и обработки результатов этих экспериментов на ЭВМ; знакомятся с современными возможностями численных расчетов газодинамических течений при помощи комплекса **MASTER Professional**. Программный комплекс **MASTER Professional** предназначен для использования в качестве учебного и исследовательского инструмента в университетах и научных учреждениях при изучении и моделировании процессов газодинамики, гидродинамики, магнитной гидродинамики, упругопластичности, детонации. Описанная установка в совокупности с комплексом **MASTER Professional** может быть использована не только для проведения лабораторных работ в рамках лабораторных практикумов по газодинамике, но и для проведения исследовательских работ силами студентов [12,13].

Заключение

В рамках лабораторного практикума по газодинамике разработана поршневая модель для изучения некоторых особенностей динамики простейшей термоядерной мишени. Проведение эксперимента на модели сочетается с численным расчетом по программе **MASTER Professional**. Эта лабораторная работа проста и безопасна, при ее проведении студенты знакомятся с техникой скоростной видеосъемки. Модель может быть использована для проведения исследовательских работ силами студентов.

В заключение авторы выражают признательность С.В.Бондаренко за полезные обсуждения, А.И.Логвинову, Ю.В.Алеханову и С.А.Ломтеву за техническую помощь, Е.Г.Юткиной за помощь в оформлении статьи.

Работа выполнена в рамках проекта ПСР 1.2.423

Литература

1. Мешков Е.Е., Руденко В.В. Комплекс лабораторных работ по газодинамике.// Материалы 13-ой Международной Школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 4-13 июня 2013 г., с.146-147.
2. Мешков Е.Е., Красовский Г.Б. Способ лабораторного моделирования задач газодинамики и устройство для его осуществления (варианты). // Патент РФ № 2393546 от 27.06.2010
3. 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.
4. Баско М.М., Шарков Б.Ю., Забродин А.В., Гуськов С.Ю., Диденко А.Н., Имшенник 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).
5. Гаранин С.Г. Концепция построения лазерной установки мегаджоульного уровня. <http://www.myshared.ru/slide/283958/>
6. Rayleigh Lord. Investigations of the character of the equilibrium of an incompressible heavy fluid of variable density.// Proc. London Math. Soc. **14**, 1883, pp.170-177.
7. 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.
8. Inogamov N.A. The Role of Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov Instabilities in Astrophysics:// An Introduction. *Astrophys.Space.Phys.* V.10, 1999, pp.335.
9. Иногамов Н.А., Демьянов А.Ю., Сон Э.Е. Гидродинамика перемешивания. // М.: Изд-во МФТИ, **1999**.
10. Мешков Е.Е. Исследования гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах. // Саров, 2006, 138 с.
11. Щербак Ю.П., Алексеев В.В., Логвинов А.И., Мешков Е.Е., Руденко В.В., Сироткина А.Г., Тачаев Г.В.. 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.
12. Вишняков А.Ю., Мелешкин Н.В., Юрина И.А.. 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.

13. *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.
14. *Руденко В.В., Шабуров М.В.* Учебно-исследовательский комплекс MASTER Professional Ver. 1.0. // Свидетельство об отраслевой регистрации разработки. №11845, 2008г.