- 3. Коленкин А.В., Гогин В.В., Стецкевич А.Д. Состояние и направления разработок многофункциональных взрывательных устройств за рубежом. Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2016. Выпуск №2.
- Физические основы функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия. Учебное пособие. Кафедра радиоэлектроники. Сибирская государственная геодезическая академия. Новосибирск 2006. стр. 38.
- 5. Ботов Е.В., Хворостин В.Н., Новиков К.П., Липшев В.Ю., Левашов П.И. Испытания элементов радиоэлектронной аппаратуры на ударную стойкость не менее 20000g. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2016. №21. Часть 2. С.410-419.

ПРАКТИКУМ ПО ГАЗОДИНАМИКЕ

Е.Е. Мешков

СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

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 использованием в газодинамическом эксперименте опасных импульсных источников энергии (взрывчатые вещества, сжатые газы, электрический взрыв и т.д.).

В этой связи последние годы в СарФТИ НИЯУ МИФИ разрабатывается практикум по газодинамике, в котором не используются опасные импульсные источники энергии. Лабораторные работы, входящие в него, основаны на использовании внутренней энергии атмосферного воздуха [1] и газогидравлической аналогии [2]. Безопасность экспериментов в этих работах позволяет студентам проводить их самостоятельно без получения специальных допусков. Практически все лабораторные работы сопровождаются численным расчетом простого одномерного газодинамического течения с использованием расчетного комплекса MASTER Professional [3].

<u>Поршневая модель динамики простейшей термоядерной мишени</u> - один из вариантов использования внутренней энергии атмосферного воздуха в виде лабораторной работы по газодинамике [4]. Общий вид подобной модели приведен на фотографии (Puc.1). В этой модели поршень из полиэтилена длиной 4 см помещается в начале канала ударной трубы. На входе в канал установлена тонкая диафрагма, отделяющая канал от окружающей атмосферы, и игла для пробоя диафрагмы. Конец канала заглушен. На корпусе канала установлен вакуумметр.



Рисунок 1. Общий вид установки, моделирующей динамику простейшей термоядерной мишени

При проведении эксперимента внутренний объем канала вакуумируется до давления $0 < P_2 < 1$ атм. После пробоя диафрагмы иглой поршень начинает двигаться внутрь канала с ускорением под действием перепада давления $\Delta P = P_1 - P_2$ (P1 - атмосферное давление окружающего воздуха). 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. В результате динамика поршня в этой модели повторяет динамику оболочки термоядерной мишени в процессе ее схлопывания. Ускорение и торможение поршня регистрируется цифровой камерой в режиме скоростной видеосъемки.

Эксперимент в этой лабораторной работе сопровождается численным расчетом по программе *MASTER Professional*. Удовлетворительное согласие расчетной X-*t* диаграммы поршня с экспериментом (рис.2) 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). Это позволяет использовать расчет для получения и других характеристик динамики процесса: ускорения поршня *a*(*t*) (*Puc.3*), а также параметров состояния сжимаемого поршнем воздуха – и, в частности, удельной внутренней энергии *e*(*t*) (*Puc.4*).



Рисунок 2. Х-*t* диаграмма внутренней границы поршня для случая *P*₂= 0,5 атм; эксперимент и расчет (кривая)



Рисунок 3. Зависимость ускоре-ния поршня от времени (расчет *P*₂= 0,5 атм)



Рисунок 4. Изменение внутренней энергии сжимаемого газа со временем (расчет $P_2 = 0,5$ атм)

Интересно отметить масштаб достигаемых ускорений – более 2000 м/с². Достигаемые значения внутренней энергии значительно превосходят значения для воздуха в окружающей среде. Это является демонстрацией кумуляции энергии в модели – процесс накопления кинетической энергии при ускорении поршня и трансформацию этой энергии во внутреннюю энергию сжимаемого газа.

В результате плотность внутренней энергии (и температура в Кельвинах) сжимаемого воздуха возрастает в ~1,5 раза.

Эти результаты указывают на возможности использования внутренней энергии атмосферного воздуха для решения ряда задач для развития практикума по газодинамике:

• возможность разработки лабораторной работы для изучения неустойчивости Рэлея-Тейлора. Первый вариант подобной установки был разработан еще в 2008 году с участием ученика лицея №15 Дениса Савицкого; в этой установке поршень со слоем воды вначале ускоряется давлением атмосферного воздуха, а затем тормозится воздухом, сжимаемым поршнем [5] (рис.5);

• возможность демонстрации кумуляции энергии при столкновении плоских слоев разной массы - двух поршней разной толщины, разделенных воздушным промежутком [6];

 при помощи расчетов показана возможность создания обычной ударной трубы, в которой давление воздуха в камере создается в импульсном режиме летящим поршнем. В подобной трубе может быть получена ударная волна с числом Maxa 2.5. И для этого потребуется только вакуумный насос и вакуумметр [7].



Рисунок 5. Денис Савицкий с моделью для демонстрации неустойчиво-сти Рэлея-Тейлора (2008 г)

Газогидравлическая аналогия [2] получила широкое распространение в практике моделирования газодинамических течений в 1950-е годы. Но в связи с развитием численных методов исследований в газодинамике интерес к этой аналогии при решении практических задач в настоящее время угас. В то же время в нашем практикуме эта аналогия занимает свое место.

Гидравлическая модель цилиндрической имплозии

Явление имплозии – симметрично сходящееся течение – сопровождается концентрацией энергии в локальной области. Известным примером эффекта кумуляции энергии в течении имплозивного типа является задача Рэлея о схлопывании полого пузырька в жидкости [8]. В представлении [9] до момента схлопывания (фокусировки) пузырька – t_f при малых радиусах r движение границы пузырька является ускоренным и описывается зависимостью $r\sim(t_f-t)^{\alpha}$ с постоянным показателем α (0< α <1), причем в приближении несжимаемой жидкости показатель равен α =0.4. Эффект кумуляции характерен также для сходящихся ударных волн в сферической и цилиндрической геометриях [10]. В 1945 г. аналогичные результаты были получены Л.Д.Ландау и К.П.Станюковичем



Рисунок 6. Схема гидравлической модели имплозии в виде динамически создаваемого жидкого кольца на горизонтальной плоской поверхности в поле тяжести перед началом течения. Кольцо ограничено по боковой поверхности цилиндрической стенкой

В СарФТИ НИЯУ МИФИ была разработана гидравлическая модель цилиндрической имплозии (рис.6) в виде жидкого кольца (ограниченного по наружному радиусу жесткой стенкой), динамически создаваемого на плоской горизонтальной поверхности [11,12].

При осесимметричном растекании (внутрь) кольца под действием силы тяжести внутренняя граница возникающего течения симметрично сходится (рис.7); при этом скорость границы кольца нарастает с уменьшением ее радиуса, демонстрируя явление кумуляции Процесс имплозии внутренней границы кольца регистрировался через зеркало, расположенное на оси симметрии кольца под углом 45°, цифровым фотоаппаратом в режиме скоростной видеосъемки.



Рисунок 7. Кадры видеограммы опыта. Вода в наружном отсеке была подкрашена зелеными чернилами, в результате визуализируется фронт сходящегося течения. Симметричное схождение в опытах достигает радиуса порядка мм, затем симметрия течения нарушается

Зависимость от времени радиуса внутренней поверхности кольца показывает, что схлопывание происходит с ускорением (рис.8). Эта же зависимость в логарифмических координатах (рис.9) в виде: $\ln r = \ln A + \alpha \ln (t_f - t)$ (где t_f – время от момента начала течения до схлопывания кольца, A – константа) имеет линейный характер у=0,74х-1,3; т.е. схлопывание жидкого кольца имеет кумулятивный характер, аналогичный характеру схлопывания полого сферического пузырька с показателем $\alpha \approx 0.74$ [14].



Рисунок 8. Зависимость от времени *t* радиуса *r* внутренней границы жидкого кольца



Рисунок 9.Зависимость от времени *t* радиуса *r* в логарифмических координатах (*t* в секундах, *r* в метрах)

В рамках данной лабораторной работы проводится численный расчет задачи академика Забабахина [15] – расчет имплозии сферической тонкостенной жидкой несжимаемой оболочки, схлопывающейся по инерции, (оболочка из воды с внутренним радиусом 10 см и толщиной 0.1 см; начальная скорость 100 м/с),

Результаты расчета (рис.10) иллюстрируют тот факт, что в процессе схлопывания оболочки начальный импульс в целом сохраняется, но при этом внутренняя граница оболочки ускоряется, а наружная тормозится; т.е. происходит перераспределение импульса от внешней части оболочки к внутренней.



Рисунок 10. Результаты расчета скорости наружной и внутренней границ тонкостенной жидкой сферической оболочки, схлопывающейся по инерции

Неустойчивость кумуляции цилиндрической имплозии. Во второй половине XX века академик Забабахин посвятил ряд работ проблемам кумуляции и её неустойчивости. В конечном итоге он пришел к выводу о том, что любая кумуляция ограничивается неустойчивостью [16].

В реальном кумулятивном процессе форма и амплитуда начального возмущения имеют случайный характер, и поэтому изучение его развития затруднено. Гидравлическая модель цилиндрической имплозии позволяет простым способом задавать начальное возмущение известной формы и малой амплитуды и исследовать его развитие со временем [17].



Рисунок 10. Задание начального возмущения жидкого кольца путём наклона модели на малый угол

Такое возмущение создается путем наклона гидравлической модели на малый угол β относительно горизонтальной плоскости стола, на которой расположена модель (рис.10). В результате кольцо оказывается разнотолщинным, и эта разнотолщинность создает начальное возмущение.

Ниже приведены кадры видеограммы опыта с углом наклона модели на угол β =1.63° (рис.11). Вода подкрашена чернилами. До поздней стадии течения (*t*=0,25 с) влияние возмущения на симметрию схлопывания внутренней границы жидкого кольца практически не наблюдается. С момента (*t*=0,25 с) начинает развиваться асимметрия течения, а с момента (*t*=0,31 с) начинает формироваться горизонтальная струя, и в результате симметрия течения полностью нарушается. Кумуляция прекращается.



Рисунок 11. Кадры видеограммы опыта с наклоном гидравлической модели на угол β=1.63°

Гидравлическая модель плоской стационарной ударной волны [18,19] может быть использована для изучения особенностей динамики такой волны. Такой аналогией является течение, возникающее в неглубоких каналах постоянного сечения при разрушении плотины. Гидравлическая модель плоской стационарной ударной волны (рис.12) в практикуме по газодинамике по сути является моделью фрагмента настоящего канала, перегороженного плотиной. Она выполнена в виде лотка прямоугольного сечения с прозрачными боковыми стенками из оргстекла. Модель состоит из двух отсеков, разделенных перегородкой. Оба они заполнены водой.

Уровень воды в левом отсеке выше, чем в правом. В воду около перегородки сбрасываются частицы полистирола, которые медленно тонут. При быстром подъеме перегородки начинается перетекание воды из одного отсека в другой. Форма возникающего при этом профиля уровня воды оказывается аналогичной форме профиля давления в простейшей ударной трубе при гипотетически мгновенном разрушении диафрагмы [20]. Фронт гидравлического скачка характеризует волновую, а фронт частиц, увлекаемых потоком, – массовую скорость. Опыты на модели помогают студентам усвоить эти понятия (рис13).



Рисунок 12. Гидравлическая модель плоской стационарной ударной волны. а) Перегородка разделяет отсеки с разным уровнем воды. В воде около перегородки медленно тонут частицы полистирола. б) После подъема перегородки возникает течение, в котором фронт гидравлического скачка характеризует волновую, а фронт частиц, увлекаемых потоком, – массовую скорость



При проведении этой лабораторной работы производится расчет течения, возникающего в простейшей ударной трубе с использованием комплекса *MASTER Professional*.

Практикум по газодинамике используется в учебном процессе СарФТИ НИЯУ «МИФИ» на протяжении ряда лет в качестве лабораторных работ в рамках курса «Кумуляция и неустойчивость» и показал свою эффективность как средство повышения усвоения студентами основ газодинамики. Выполнение этих работ позволяет студентам гораздо глубже усвоить такие ключевые понятия газодинамики, как ударные волны, имплозия, кумуляция, гидродинамические неустойчивости и др.

При проведении лабораторных работ студенты получают:

• навыки проведения газодинамических экспериментов с применением цифровой регистрирующей техники;

• опыт обработки результатов этих экспериментов на ЭВМ;

• первый опыт проведения численных расчетов простейших одномерных газодинамических течений.

Эта работа практикума в феврале 2012 г была успешно использована при проведении Экспресс-Проекта «Кумуляция в гидродинамике» в рамках Всероссийского Фестиваля детского технического творчества, в котором принимали участие школьники из 17-ти городов РОСАТОМА (рис.14).

Практикум был использован в работах факультета повышения квалификации, во время Дней Открытых Дверей для школьников из Дивеево, Первомайска и Нижнего Новгорода.

Модели практикума используются для проведения исследовательских работ силами студентов и старшеклассников школ г. Сарова





Рисунок 14. Старшеклассники городов РОСАТОМА - участники Всероссийского Фестиваля Детского Технического Творчества (2012 г) проводят эксперименты на гидравлической модели имплозии

Ведется разработка новых работ:

- Кумуляция энергии при столкновении плоских слоев.
- Неустойчивость Рэлея-Тейлора.
- Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова
- Memod PDV

Список литературы

- 1. Мешков Е.Е, Красовский Г.Б. Способ лабораторного моделирования задач газодинамики и устройство для его осуществления (варианты). // Патент РФ № 2393546 от 27.06.2010
- 2. Н.Н. Сунцов. Методы аналогий в аэрогидродинамике. //М., Физматгиз, 1958
- 3. В.В.Руденко, М.В.Шабуров, Е.В.Чехунов. Труды Региональной конференции по научному программному обеспечению. 2-3 февраля 2006 г. Санкт-Петербург. С.121.
- 4. А.С.Барышев, Д.Н.Замыслов, Е.Е.Мешков, И.А.Новикова, В.В.Пичугов, В.В.Руденко, Г.М.Янбаев. Модель динамики термоядерной мишени.// Физ. образование в ВУЗах, т.20, №1, 2014, сс.54-62.
- 5. Мешков Е.Е., Савицкий Д.О., Лабораторная модель для изучения неустойчивости Рэлея-Тейлора // Вестник Саровского Физтеха №15,2008, с. 146-149.

- 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.
- А.С.Барышев, А.Б.Георгиевская, Д.Н.Замыслов, Е.Е.Мешков, К.Н.Панов, П.В.Хуторной. Ударная труба с газодинамическим подогревом драйвера.// Сб.Трудов межд. конф. XVII Харитоновские Тематические Научные Чтения. Саров, 23-27 марта 2015 г. с.815- 818.
- 8. Rayleigh L. Phil.Mag. 34, 94, 1917
- 9. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. //Изд. «Наука», Москва, 1966г
- 10. G.Guderley//Luftfahrforschung, 19, 302, 1942
- 11. С.В.Бондаренко, А.Б.Георгиевская, Д.Н.Замыслов, И.С.Калинин, В.А.Клевцов, Г.Б. Красовский, Е.Е.Мешков, И.А.Новикова, Л.Л.Огородников, В.В. Руденко. Гидравлическая модель цилиндрической имплозии.//Физ. образование в ВУЗах, т.22, №2, 2016, сс.85-94.
- 12. Е.Е.Мешков. Рэлей, Гудерлей и Леон Огородников.// АТОМ, №65, с. 41-46, 2015.
- 13. Майер В. В. Кумулятивный эффект: учебные исследования. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 208 с.
- 14. М.Д.Камчибеков, Е.Е.Мешков, Е.М.Грязева, И.А.Новикова «Экспериментальное исследование гидродинамической модели цилиндрической имплозии» // Международная конференция «XIX Харитоновские тематические научные чтения», сборник тезисов докладов, Саров 17-21 апреля 2017 г. с.215.
- 15. Е.И.Забабахин. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск, 1997г., с.200
- 16. Е.И.Забабахин. Письма в ЖЭТФ, т.30, вып.2, с.97-99, 1979
- А.Б.Георгиевская, Е. М. Грязева, А. Г. Иоилев, М. Д. Камчибеков, Е. Е. Мешков, Р.В.Мокрецов, А. В. Немцева, А. С. Репин, И.Р.Смагин, А.Д.Шамшин. Неустойчивость кумуляции цилиндрической имплозии. //Физ. образование в ВУЗах, т.24, №3, с.124-132, 2018
- 18. В.М.Бельский, Е.Е.Мешков, А.А.Точилина. Модель ударной волны// Сб. аннотаций Научной Сессии НИЯУ МИФИ 2012. Т.3, с.105.
- 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.
- 20. С.В.Богомолов и др. Математическое моделирование.Т.14. №3. С.103, 2003.

КМОП ФОТОПРИЕМНИК ФОРМАТА 256×128 ЯЧЕЕК ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ИЗ 16 КАДРОВ С ИНТЕРВАЛОМ ДО 50 нс

Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, Ю.А. Барсуков

ООО "РТК ИНПЕКС", Мытищи, Россия

Значительный прогресс в многокадровых системах регистрации быстропротекающих слабоконтрастных процессов возможен при создание специализированной компонентой базы, в частности матричного многокадрового быстродействующего КМОП фотоприемника, позволяющего регистрировать десятки и более быстрых кадров.

Ранее нами был создан прототип КМОП фотоприемника с 8 быстрыми кадрами "F-8" формата 128×64 ячеек размером 40×40 мкм [1], а на его основе - макет камеры [2]. Использование