

Практикум по газодинамике

Е. Е. МЕШКОВ

Если спросить у читателя: «Можно ли обычный, окружающий нас воздух, воздух, которым мы дышим, использовать как энергетический материал?» – изумленный читатель, наверное, воскликнет: «Воздух как энергетический материал?! Какая ерунда!».

Но не будем торопиться с выводами. Плотность внутренней энергии воздуха при комнатной температуре $e_{\text{воздуха}} = 0,21$ кДж/г, и это ~ 5 % от внутренней энергии продуктов взрыва тротила $e_{\text{тротила}} = 4$ кДж/г. Не так уж мало!

Давайте рассмотрим простой пример: поршень из полиэтилена длиной 4 см ускоряется давлением атмосферного воздуха в вакуумированном канале. Элементарные оценки показывают, что скорость поршня в данном случае при разгоне на базе 30 см может достигать 40 м/с. Такой масштаб достигаемых скоростей может быть достаточен для проведения многих опытов по газодинамике и, с другой стороны, не превышает уровень опасности, с которой человек может столкнуться в повседневной жизни

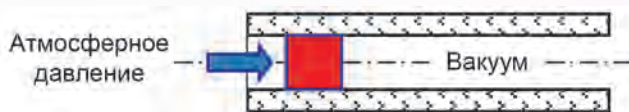
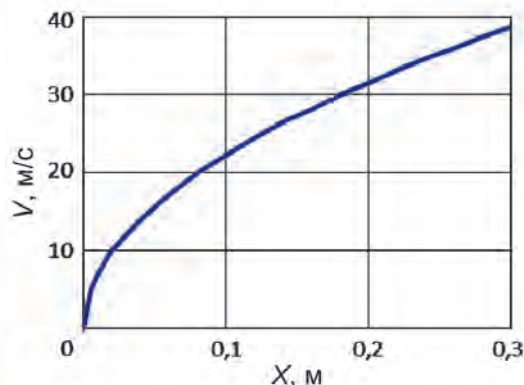


Схема «атмосферной» ударной трубы, в вакуумированном канале которой поршень ускоряется давлением атмосферного воздуха



Зависимость скорости поршня из полиэтилена длиной 4 см, ускоряемого давлением атмосферного воздуха в вакуумированном канале, от пройденного пути

(например, хоккейная шайба может лететь со скоростью ~ 45 м/с, скорость ураганного ветра 50 м/с и более).

Газодинамика является одной из составляющих научного фундамента ВНИИЭФ и получение базовых представлений о ней необходимо не только будущим газодинамикам, но и студентам других специальностей, например, прикладным физикам и математикам. Одним из наиболее эффективных путей получения таких представлений являются лабораторные работы. Между тем, внедрение лабораторных работ по газодинамике в рамках университетских курсов в практику обучения студентов является хотя и актуальной, но вместе с тем трудноразрешимой задачей. Трудности имеют организационный характер и связаны с тем, что традиционно в газодинамическом эксперименте используются опасные энергетические материалы (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 (Е. Е. Мешков, Г. Б. Красовский. Способ лабораторного моделирования задач газодинамики и устройство для его осуществления (варианты) // Патент РФ № 2393546) и газогидравлической аналогии. 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 (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).

Поршневая модель динамики простейшей термоядерной мишени – один из вариантов использования внутренней энергии атмосферного воздуха в виде лабораторной работы по газодинамике (А. С. Барышев, Д. Н. Замыслов,

Е. Е. Мешков и др. Физическое образование в ВУЗах, 2014, т. 20, № 1, с. 54). Общий вид подобной модели приведен на фотографии. 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.



Общий вид установки, моделирующей динамику простейшей термоядерной мишени

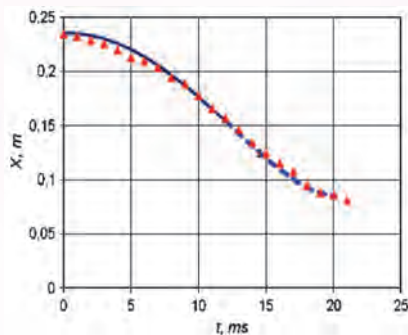
При проведении эксперимента внутренний объем канала вакуумируется до давления $0 < P_2 < 1$ атм. После пробоя диафрагмы иглой поршень начинает двигаться внутрь канала с ускорением под действием перепада давления $\Delta P = P_1 - P_2$ (P_1 – атмосферное давление окружающего воздуха). В процессе движения 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 указывает на слабое влияние таких факторов, как трение поршня о стенки канала и потери тепла в стенке 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 $a(t)$, а также параметров состояния сжимаемого поршнем воздуха – и, в частности, удельной внутренней энергии $e(t)$.

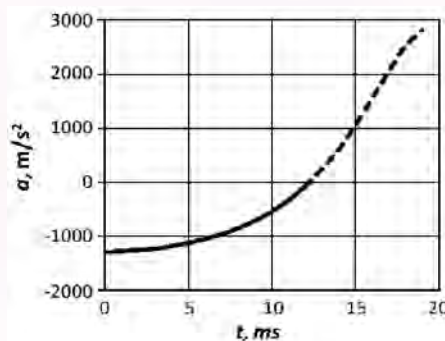
Интересно отметить масштаб ускорений – более 2000 м/с^2 . Достижимые значения внутренней энергии значительно превосходят значения для воздуха в окружающей среде. Это является демонстрацией кумуляции энергии в модели – процесса накопления кинетической энергии при ускорении поршня и трансформации этой энергии во внутреннюю энергию сжимаемого газа. В результате плотность внутренней энергии (и температура в Кельвинах) сжимаемого воздуха возрастает в $\sim 1,5$ раза.

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

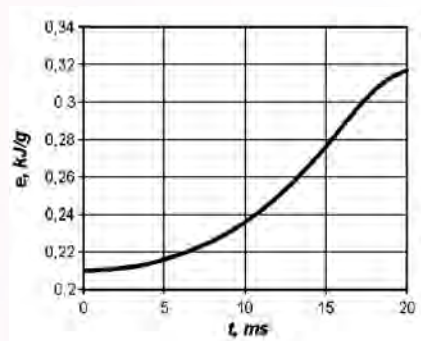
- возможность разработки лабораторной работы для изучения неустойчивости Рэля–Тейлора. Первый вариант подобной установки был разработан еще в 2008 г. с участием ученика лицея № 15 Дениса Савицкого; в этой установке поршень со слоем воды вначале ускоряется давлением атмосферного воздуха, а затем тормозится воздухом, сжимаемым поршнем (Е. Е. Мешков, Д. О. Савицкий // Вестник Саровского физ. теха. 2008, № 15, с. 146–149);



$X-t$ диаграмма внутренней границы поршня для случая $P_2 = 0,5$ атм; эксперимент и расчет (кривая)



Зависимость ускорения поршня от времени (расчет $P_2 = 0,5$ атм)



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



Денис Савицкий с моделью для демонстрации неустойчивости Рэлея–Тейлора, 2008 г.



Студентка СарФТИ Ирина Юрина участвует в проведении опыта на атмосферной ударной трубе, 2009 г.

- возможность демонстрации кумуляции энергии при столкновении плоских слоев разной массы – двух поршней разной толщины, разделенных воздушным промежутком (А. Ю. Вишняков, Н. В. Мелешкин, И. А. Юрина // Сб. аннотаций конференции «Науч. сессия МИФИ 2009», т. 1, с. 160);

- при помощи расчетов показана возможность создания обычной ударной трубы, в которой давление воздуха в камере создается в импульсном режиме летящим поршнем; может быть получена ударная волна с числом Маха 2,5. И для этого потребуется только вакуумный насос и вакуумметр (А. С. Барышев, А. Б. Георгиевская, Д. Н. Замыслов и др. Сб. тр. между конф. «XVII ХНЧ», 2015, с. 815).

Газогидравлическая аналогия (Н. Н. Сунцов. Методы аналогий в аэрогидродинамике // М.: Физматгиз, 1958) получила широкое распространение в практике моделирования газодинамических течений в 1950-е гг. 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. В представлении (Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпе-

ратурных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966) 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 ($0 < \alpha < 1$), причем в приближении несжимаемой жидкости показатель равен $\alpha = 0,4$. Эффект кумуляции характерен также для сходящихся ударных

волн в сферической и цилиндрической геометриях (G. Guderley // Luftfahrtforschung, 19, 302, 1942). В 1945 г. аналогичные результаты были получены Л. Д. Ландау и К. П. Станюковичем.

В СарФТИ НИЯУ МИФИ была разработана гидравлическая модель цилиндрической имплозии в виде жидкого кольца (ограниченного по наружному радиусу жесткой стенкой), динамически создаваемого на плоской горизонтальной поверхности (С. В. Бондаренко, А. Б. Георгиевская, Д. Н. Замыслов и др. Физическое Образование в ВУЗах, 2016, т. 22, № 2, с. 85)¹.

При осесимметричном растекании кольца под действием силы тяжести внутренняя граница возникающего течения симметрично сходится; при этом скорость границы кольца нарастает

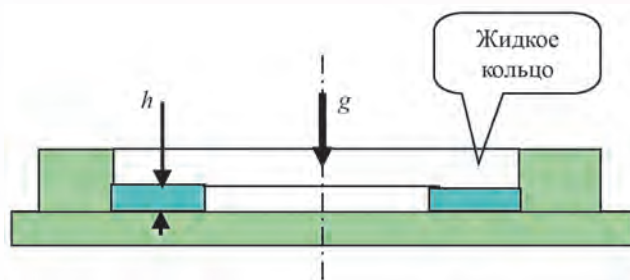
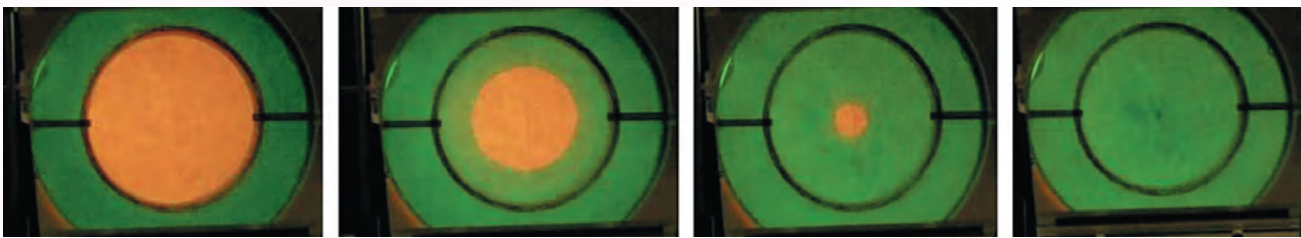
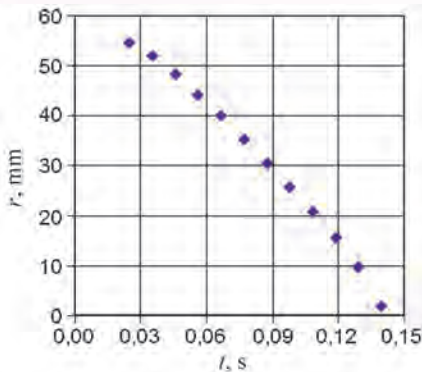


Схема гидравлической модели имплозии в виде динамически создаваемого жидкого кольца на горизонтальной плоской поверхности в поле тяжести перед началом течения. Кольцо ограничено по боковой поверхности цилиндрической стенкой

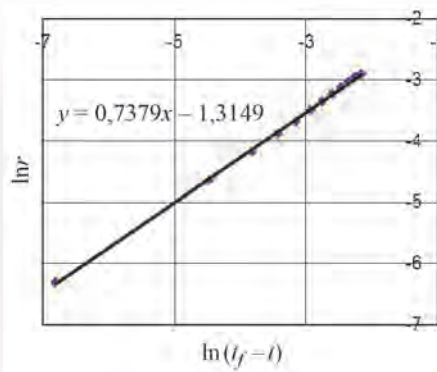
¹История создания этой модели была описана ранее (Е. Е. Мешков // Атом, 2015, № 65, с. 41–46).



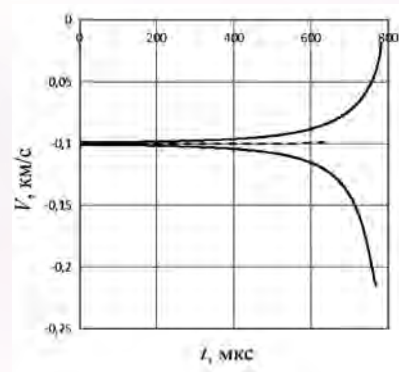
Кадры видеोगраммы опыта. Вода в наружном отсеке была подкрашена зелеными чернилами, в результате визуализируется фронт сходящегося течения. Симметричное схождение в опытах достигает радиуса порядка мм, затем симметрия течения нарушается



Зависимость от времени t радиуса r внутренней границы жидкого кольца



Зависимость от времени t радиуса r в логарифмических координатах (t в секундах, r в метрах)



Результаты расчета скорости на ружной и внутренней границ тонкостенной жидкой сферической оболочки, схлопывающейся по инерции

с уменьшением ее радиуса, демонстрируя явление кумуляции². Процесс имплозии внутренней границы кольца регистрировался через зеркало, расположенное на оси симметрии кольца под углом 45°, цифровым фотоаппаратом в режиме скоростной видеосъемки.

Зависимость от времени радиуса внутренней поверхности кольца показывает, что схлопывание происходит с ускорением. Эта же зависимость в логарифмических координатах 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 $y = 0,74 - 1,3$; т. е. схлопывание жидкого кольца имеет кумулятивный характер, аналогичный характеру схлопывания полого сферического пузырька с показателем $\alpha \approx 0,74$ (М. Д. Камчибеков и др. Сб. тезисов межд. конф. «XIX ХНЧ», 2017, с. 215).

В рамках данной лабораторной работы проводится численный расчет задачи академика Забабахина (Е. И. Забабахин. Некоторые во-

просы газодинамики взрыва. Снежинск, 1997, с. 200) – 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 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.

Неустойчивость кумуляции цилиндрической имплозии. Во второй половине XX века академик Забабахин посвятил ряд работ проблемам кумуляции и ее неустойчивости. В конечном итоге он пришел к выводу о том, что любая кумуляция ограничивается неустойчивостью (Е. И. Забабахин. Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, вып. 2, с. 97–99).

В реальном кумулятивном процессе форма и амплитуда начального возмущения имеют случайный характер, поэтому изучение его развития затруднено. Гидравлическая модель цилиндрической имплозии позволяет простым способом задавать начальное возмущение извест-

²В известной мере эта модель является развитием постановки лабораторных экспериментов, демонстрирующих явление имплозии и кумуляции в учебных целях (В. В. Майер. Кумулятивный эффект: учебные исследования. М.: Физматлит, 2007).

ной формы и малой амплитуды и исследовать его развитие со временем (А. Б. Георгиевская, Е. М. Грязева, А. Г. Иоилев и др. Физическое образование в ВУЗах, 2018, 24, № 3, с. 124).

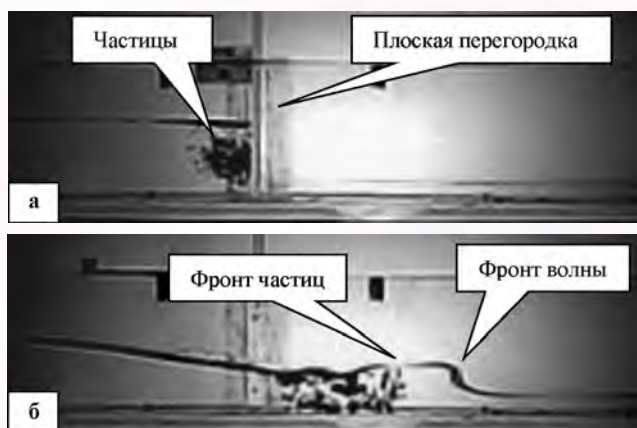
Такое возмущение создается путем наклона гидравлической модели на малый угол β относительно горизонтальной плоскости стола, на которой расположена модель. В результате кольцо оказывается разнотолщинным, и эта разнотолщинность создает начальное возмущение.



Задание начального возмущения жидкого кольца путем наклона модели на малый угол

Ниже приведены кадры видеогаммы опыта с углом наклона модели на угол $\beta = 1,63^\circ$. 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.

Гидравлическая модель плоской стационарной ударной волны 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 в практикуме по газодинамике по сути является моделью фрагмента настоящего канала, перегороденного плотиной. Она выполнена в виде лотка прямоугольного сечения с прозрачными

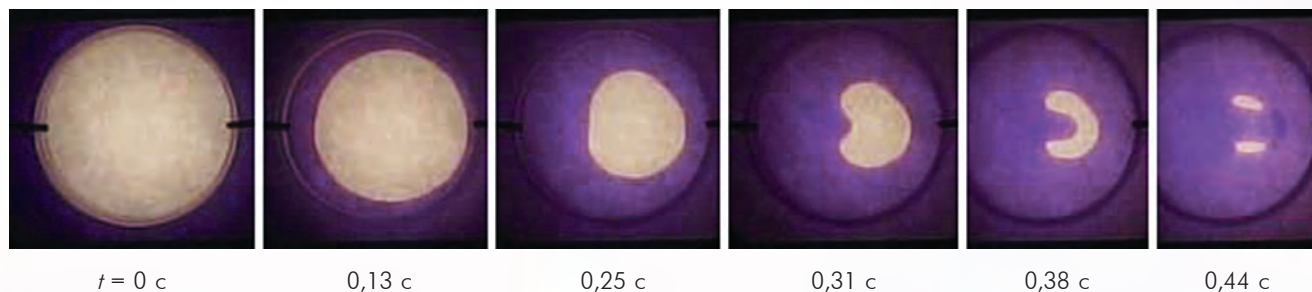


Гидравлическая модель плоской стационарной ударной волны: а – перегородка разделяет отсеки с разным уровнем воды. В воде около перегородки медленно тонут частицы полистирола; б – после подъема перегородки возникает течение, в котором фронт гидравлического скачка характеризует волновую, а фронт частиц,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

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 гипотетическом мгновенном разрушении диафрагмы (С. В. Богомолов и др. Математическое моделирование, 2003, т. 14, № 3, с. 103). Фронт гидравлического скачка характеризует волновую, а фронт частиц, увлекаемых потоком, – массовую скорость. Опыты на модели помогают студентам усвоить эти понятия.

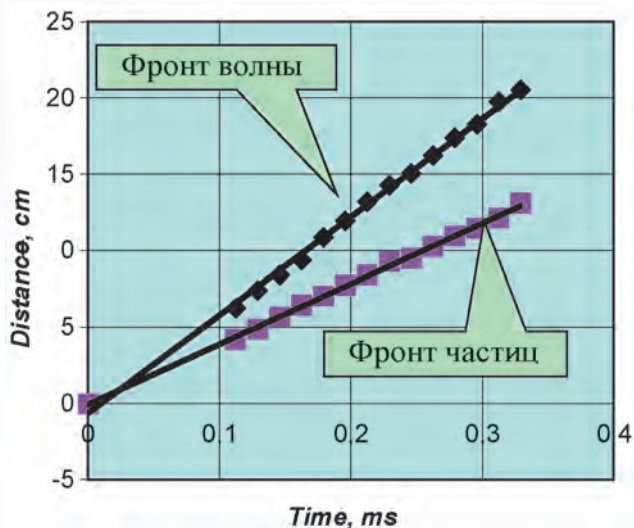
При проведении этой лабораторной работы производится расчет течения, возникающего в простейшей ударной трубе с использованием комплекса MASTER Professional.



Кадры видеогаммы опыта с наклоном гидравлической модели на угол $\beta = 1,63^\circ$



Ученица гимназии № 2 Аня Точилина с отцом проводит первые эксперименты на гидравлической модели, 2011 г.



X-t диаграмма фронта волны и фронта частиц



Старшеклассники городов РОСАТОМА – участники Всероссийского фестиваля детского технического творчества (2012 г.) проводят эксперименты на гидравлической модели имплозии

Практикум по газодинамике используется на протяжении ряда лет в учебном процессе СарФТИ НИЯУ МИФИ в качестве лабораторной работы в рамках курса «Кумуляция и неустойчивость» и показал свою эффективность как средство повышения усвоения 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 использована при проведении экспресс-про-

екта «Кумуляция в гидродинамике» в рамках Всероссийского фестиваля детского технического творчества, в котором принимали участие школьники из 17-и городов РОСАТОМА.

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.

Ведется разработка новых работ:

- кумуляция энергии при столкновении плоских слоев;
- неустойчивость Рэля – Тейлора;
- неустойчивость Рихтмайера – Мешкова;
- метод PDV.

МЕШКОВ Евгений Евграфович – зав. учебно-исследовательской гидродинамической лабораторией СарФТИ, кандидат физ.-мат. наук