

# ОПЫТ ПРИВЛЕЧЕНИЯ ШКОЛЬНИКОВ И СТУДЕНТОВ К ИССЛЕДОВАНИЯМ В ОБЛАСТИ ГИДРО-ГАЗОДИНАМИКИ

Мешков Е.Е.

СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, РФ

**Аннотация.** Приводится обзор работ в области гидро-газодинамики, выполненных в СарФТИ НИЯУ МИФИ за последние более, чем десять лет с непосредственным участием школьников и студентов.

Среди проблем, стоящих перед российским обществом и российским государством, на одном из первых мест стоит проблема модернизации образования в соответствии с реалиями и вызовами 21 века. В частности, является актуальной задача привлечения молодежи к научной работе. В Саровском Физико-Техническом Институте НИЯУ МИФИ на базе гидродинамической лаборатории на протяжении более десяти последних лет проводятся исследования задач гидродинамики с непосредственным участием школьников (ученики 9-11 классов лицеев №3, №15 и гимназии №2 г.Сарова) и студентов СарФТИ. За прошедшие годы школьниками было выполнено более 30 работ, представленных на Школьных Харитоновских Чтениях (ШХЧ). Ряд работ был опубликован на научных конференциях (в том числе международных) и в статьях в журналах (включая зарубежные)<sup>1</sup>. Эти успехи были следствием стечения целого ряда обстоятельств: развитие цифровой регистрирующей аппаратуры в последнее десятилетие; контакты школьников с сотрудниками ВНИИЭФ, принимавшими участие в работе лаборатории; открытость и доступность лаборатории, которая расположена рядом с «продвинутыми» школами Сарова; постоянные и тесные контакты с лицеями №15 и №3 и гимназией №2;

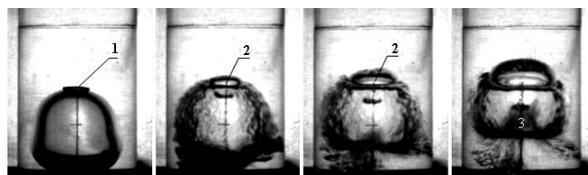
Значительная часть работ, проводимых в СарФТИ, связана с исследованиями фундаментальных проблем гидродинамических неустойчивостей. В частности, это вопрос о природе скачка концентрации на краю зоны турбулентного перемешивания (ЗТП) [1], возникающей при развитии неустойчивости границы сред разной плотности, движущейся с ускорением (неустойчивость Рэля-Тейлора).

Устойчивость купола воздушного пузыря в воде. При развитии ЗТП на границе газ-жидкость газ проникает в жидкость в виде ансамбля укрупняющихся со временем пузырей. Частным случаем такой ситуации является пузырь Тейлора – пузырь, всплывающий в вертикальной трубе с водой. Ряд работ [2-4] связан с исследованием механизмов



Фиг.1.Даня Мешков и Витя Сиволгин проводят эксперимент

аномальной устойчивости купола воздушного пузыря, всплывающего в воде. В частности, фиг. 2 показывает



Фиг.2.Развитие кольцевого возмущения (2) на поверхности пузыря, всплывающего в цилиндрическом канале с водой. Возмущение создавалось кольцом (1), помещенном на куполе резиновой оболочки перед ее разрушением [5]

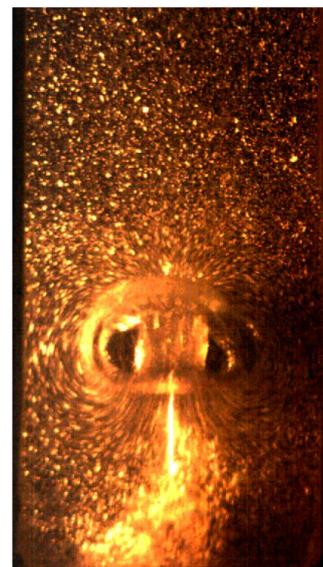
как начальное осесимметричное возмущение на поверхности пузыря, вместо того, чтобы расти, скатывается вниз, а вершина купола остается невозмущенной [5].

Образование вихревого кольца. При подъеме в воде крупного воздушного пузыря формируется вихревое кольцо. Динамика формирования, подъема и разрушения такого кольца описана в работах [2-4,6]. Школьники разработали методику «светового ножа» (фиг.3) [6], которая позволила визуализировать поле течения как в вихревом кольце, так и вне кольца, одновременно эта методика позволяет визуализировать поле скоростей около кольца (фиг.4).



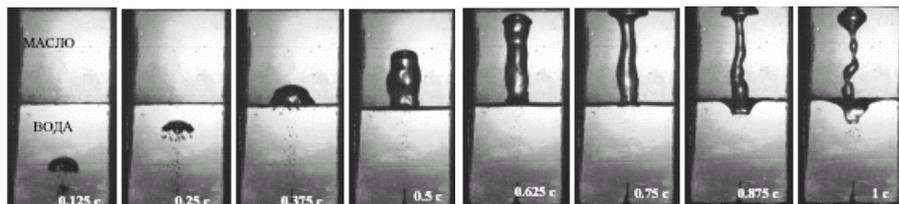
Фиг.3.Володя Игнатьев, Антон Слдадков и Алеша Долотов проводят эксперимент методом «светового ножа» [6].

Фиг.4.Картина течения внутри и около вихревого кольца [6], полученная методом «светового ножа»



<sup>1</sup> Общее число публикаций работ, выполненных с участием школьников и студентов, более 50-ти; за недостатком места здесь приводятся ссылки только на самые значимые работы.

В подобных экспериментах исследовалась картина течения за поднимающимся пузырьком и, в частности, визуализация присоединенной массы воды, увлекаемой всплывающим пузырьком (фиг.5).



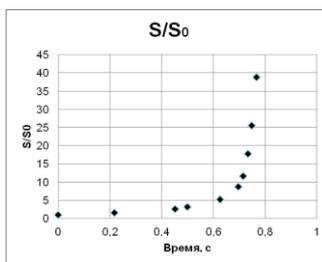
Фиг.5. Небольшой воздушный пузырек проходит через границу между водой и трансформаторным маслом и увлекает за собой большое количество воды [7].

Неустойчивость Рэлея-Тейлора тонкого жидкого слоя. С участием школьников была разработана методика исследования деформации свободно падающего цилиндрического водяного снаряда. При падении снаряд трансформируется под действием аэродинамических сил, приобретая форму диска. Рост диаметра диска происходит с ускорением и завершается стремительным, взрывоподобным увеличением площади поперечного сечения диска. При этом возникает отклонение от режима свободного падения этого диска вследствие быстрого роста сопротивления натекающего потока воздуха, развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора и разрушение диска с образованием облака капелек [8,9].

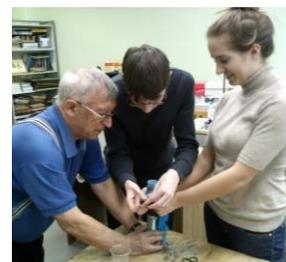


Фиг.6. Трансформация цилиндрического водяного снаряда ( $V=45$  мл,  $h/d=2.4$ ) (верхний ряд) и конечная стадия разрушения снаряда под действием неустойчивости Рэлея-Тейлора ( $V=45$  мл,  $h/d=1.23$ ) (нижний ряд) [9].

масштаба сил лобового сопротивления, и, в финальной стадии полета, когда сила сопротивления превосходит масштаб прочности вещества метеорита (камень), происходит взрывное увеличение площади поперечного сечения метеорита, разрушение на фрагменты и, как следствие, **взрывное** увеличение трансформации кинетической энергии метеорита в энергию ударной волны в воздухе.

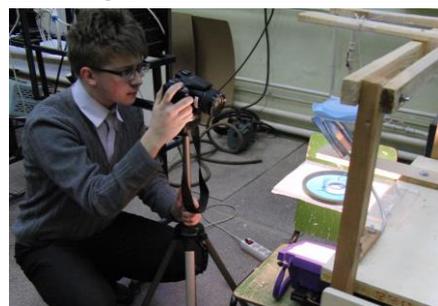


Фиг.7. Зависимость площади поперечного сечения снаряда (отнесенной к начальному значению) от времени. (45 мл,  $h/d=1.23$ ) [9].



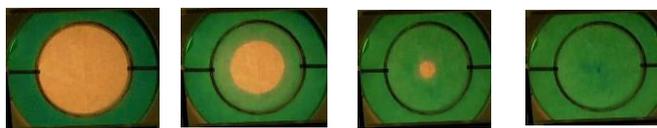
Фиг.8. Г.М. Янбаев, Рома Каньгин и Маша Пикалова готовят опыт

Демонстрационная модель явления имплозии и кумуляции. В течение 2010-2012 гг ученик лицея №3 Леон Огородников (фиг.9) совместно с сотрудниками СарФТИ разрабатывал гидравлическую модель имплозии. Эксперименты на втором варианте модели (фиг. 10) демонстрируют как имплозию, так и кумуляцию [10].



Фиг.9. Леон Огородников проводит эксперимент на первом варианте модели

Модификация второго варианта модели была использована при проведении Экспресс-Проекта «Кумуляция в гидродинамике. Модельный и численный эксперимент» в рамках Всероссийского детского научно-технического Фестиваля «Люди будущего», прошедшего в Сарове 23 февраля 2012 года. В рамках проекта принимали участие команды школьников 17-ти городов РОСАТОМа (более 60-ти учеников). Участники проекта проводили как модельные (фиг.11), так и численные эксперименты с применением комплекса MASTER Professional [11].



Фиг.10. Второй вариант устройства для моделирования имплозии (вверху) и результаты эксперимента на ней (нижний ряд) демонстрируют не только имплозию, но и кумуляцию: фронт сходящегося потока воды (подкрашенной зеленой тушью) движется к центру с ускорением.



Фиг.11. Проведение модельного эксперимента

Исследования вихревых воронок, возникающих при сливе воды из сосуда, проводятся с целью их гашения. В экспериментах, выполненных с участием Андрея Сироткина (ученика 11 кл лицея №3), с повышением уровня воды после образования вихревой воронки было экспериментально обнаружено явление затухания воронки [12]. В экспериментах, выполненных с участием Миши и Бори Базаровых (ученики гимназии №2) и их отца Ю.Б.Базарова (сотрудника ВНИИЭФ), было обнаружено явление «расщепления» воронки [13]; в последующих экспериментах была показана возможность полного гашения воронки при помощи демпфера – плоской пластины с характерными размерами порядка диаметра сливного отверстия, установленной по оси отверстия [14].

Практикум по газодинамике. В работе [15], выполненной с участием Дениса Савицкого (ученика 11 кл. гимназии №2), была создана демонстрационная модель неустойчивости Рэля-Тейлора (фиг.12), в которой контейнер со слоем воды ускорялся в вакуумированном (до давления  $\sim 70$  кПа) канале давлением окружающего воздуха, а затем тормозился сжимаемым воздухом в канале. Эта модель и модель имплозии Леона Огородникова стали отправной точкой для разработки комплекса лабораторных работ по газодинамике [16]. Лабораторные работы являются эффективным средством повышения усвоения студентами ключевых понятий газодинамики, но их внедрение в учебный процесс затруднено в связи с использованием в газодинамическом эксперименте (как правило) опасных импульсных источников энергии (взрывчатые вещества, сжатые газы, электрический взрыв и т.п.). Практикум по газодинамике [16], разрабатываемый с участием студентов и аспирантов СарФТИ НИЯУ МИФИ, основан на применении поршневой ударной трубы, (в которой в качестве импульсного источника энергии используется энергия окружающего воздуха) [17] и гидравлических аналогов ударной волны (метод «мелкой воды») [18]. В настоящее время разработаны и внедрены в учебный процесс лабораторные работы: «Поршневая модель динамики термоядерной мишени» [19], «Гидравлическая модель ударной волны», «Гидравлическая модель имплозии» (проект ПСР 1.2.423, 2013г) и «Откол» (2014г). Разработка практикума продолжается, планируется разработка лабораторных работ «Неустойчивость Рэля-Тейлора», «Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова» и др. Ведется работа по созданию виртуального варианта практикума.

Фиг.12. Денис Савицкий с моделью, для демонстрации неустойчивости Рэля-Тейлора [14].



Все эти работы основаны на безопасных экспериментах, что позволяет проводить их студентам без получения ими специальных допусков. Они могут быть использованы не только для проведения лабораторных работ по газодинамике, но и для проведения исследовательских работ силами студентов.



Фиг.13. Студенты СарФТИ проводят лабораторную работу по теме «Гидравлическая модель имплозии».

## Литература

1. E.E.Meshkov // *Phil. Trans. R. Soc.* 2013, A2013 371, 20120288
2. Д.Е. Мешков, Е.Е. Мешков, В.С. Сиволгин // *Вестник Саровского Физтеха*. 2005, №8, стр.68-73
3. Ю.Б. Базаров, Д.Е. Мешков, Е.Е. Мешков, и др. // *Вестник Саровского Физтеха*, 2006 г., №10, с.33-40.
4. E.E.Meshkov, D.E.Meshkov, V.S.Sivolgin//*Proc. of the 10<sup>th</sup> IWPCTM, Paris, France*, 2006, pp. 238-243
5. Y B Bazarov, S E Kuratov, D E Meshkov et al. // *Physica Scripta*, 2010, 014018,
6. Ю.Б. Базаров, А.С. Долотов, В.Ю. Игнатьев, и др. // *Вестник Саровского Физтеха*, 2006 г., №10, с. 41-49
7. Мармышев В.В., Мешков Д.Е., Мешков Е.Е и др. // *Вестник Саровского Физтеха*, 2005 г., №9, с.21-25.
8. Yu.B.Bazarov, R.I.Kanygin, E.E.Meshkov, M.A.Pikalova, Ya.V.Fedorenko, G.M.Yanbayev, *Proc. of Int. Conf. «Fluxes and Structures in Fluids»*. St. Petersburg, 2013, p.26-28.
9. Ia.V.Fedorenko, R.I.Kanygin, E.E.Meshkov, M.A.Pikalova, G.M.Yanbayev // *Abstracts of Turbulent Mixing and Beyond Workshop, Trieste, Italy*, 2014, p. 4
10. A.B.Georgievskaya, E.E.Meshkov, L.L.Ogorodnikov, A.D.Shamshin, I.A.Yurina. //*Proc. Abstracts of 3 Int. Conf. "Turbulent Mixing and Beyond"*. Trieste, Italy, 2011, p. 139
11. Руденко В.В., Шабуров М.В. *Учебно-исследовательский комплекс MASTER Professional Ver. 1.0. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки. №11845, 2008г*
12. E.E.Meshkov, A.A.Sirotkin.//*Physica Scripta*, 2013, T155, 014058
13. M.Yu. Bazarov, Yu.B. Bazarov, M.B. Golubev, E.E. Meshkov // *Procedia IUTAM*, 2013, Vol. 8, P. 39–42
14. V.Y.Bazarov, M.Y.Bazarov, Y.B.Bazarov, M.B.Golubev, E.E.Meshkov,. *Proc. of Int. Conf. «Fluxes and Structures in Fluids»*. St. Petersburg, 2013, p.28-31.
15. Е.Е.Мешков, Д.О.Савицкий // *Вестник Саровского Физтеха №15, 2008, с. 146-149*
16. Е.Е.Мешков, В.В.Руденко. // *Тезисы докл. 13 Межд.школы МММ-13, Евпатория, 2013 г., с.146-147.*
17. Е.Е. Мешков, Г.Б.Красовский // *Патент РФ № 2393546 от 27.06.2010*
18. Н.Н. Сунцов, *Методы аналогий в аэрогидродинамике*. М., Физматгиз, 1958
19. А.С.Барышев, Д.Н.Замыслов, Е.Е.Мешков, и др.// *Физическое образование в ВУЗах, 2014, т.20, №1, сс.54-62.*