

Как мы с Женей пузыри пускали

В. Г. РОГАЧЕВ



В. Г. Рогачев

Наука – штука изумительная. Порой в ней открываются невероятные аналогии и связи между, казалось бы, совсем непохожими явлениями. По какой-то загадочной причине природа демонстрирует свое единство, как если бы у Создателя был ограниченный набор средств для сотворения материального мира.

Школьникам и студентам на занятиях по физике демонстрируют различные примеры такого материального единства. Например, гармонические колебания механического маятника физически подобны гармоническим колебаниям в электрическом контуре, состоящем из индуктивности и емкости. В электрическом контуре есть аналоги потенциальной и кинетической энергии, а зависимость напряжения от времени описывается в точности таким же дифференциальным уравнением, что и зависимость от времени амплитуды колебания механического маятника, то есть имеется подобие между столь не схожими явлениями. Однако не надо сильно радоваться: подобие никогда не бывает полным. Имеются второстепенные процессы, которые нарушают идеальное подобие, что, кстати, делает наш мир разнообразным и цветным. В рассматриваемом примере процессы диссипации энергии, по-разному протекающие в механическом и электрическом маятниках, могут нарушать это подобие. И лишь в случае, когда диссипацией можно пренебречь, картина подобия торжествует.

Еще одним удивительным примером подобия является аналогия между процессами колебания и деформации капли жидкости (с учетом поверхностного натяжения) и процессом деформации тяжелого атомного ядра. Это подобие, которое, конечно, не является стопроцентно полным, было положено классиками в основу так называемой капельной модели ядра, сыгравшей важную роль в ядерной физике. То есть, как и в предыдущем примере, явления совершенно раз-

личной природы имеют схожие черты.

Примеров физического подобия невероятное множество и оно, это подобие, является мощным инструментом физиков при исследовании природы, поскольку позволяет уверенно опираться на ранее полученные знания. Для того, чтобы пользоваться этим инструментом познания требуется выполнение некоторых общих принципов, которые можно постараться сформулировать следующим образом:

- не бояться смелых гипотез;
- аргументированно пренебрегать второстепенными деталями (физика – это наука пренебрегать);
- строить простые физические модели исследуемых процессов (в простоте – сила);
- строить простые, но адекватные математические модели (математика – язык познания);
- искать аналогии с процессами в других областях физики.

Ни в коей мере не претендуя на назидательность или открытие чего-то уж совсем необычного, автор искренне следует этим правилам. В ряде случаев обнаружение физических аналогий позволило ему прийти к практическому решению ряда задач. Речь пойдет о ядерных взрывах. Известно, что при ядерном взрыве в воздухе вначале образуется быстро расширяющийся огненный шар, радиус которого со временем перестает увеличиваться, и далее шар всплывает в поле тяжести вверх, превращаясь во вращающееся тороидальное кольцо (бублик). Зачастую, в зависимости от влажности окружающего воздуха, горячая область ядерного взрыва окутана конденсационными облаками, которые на ее подъем не влияют, но наблюдениям мешают. При взрывах в сухой атмосфере, когда конденсационные образования прозрачны, хорошо видно, что светящаяся внутренность вращающегося и всплывающего бублика представляет собой сильно нагретый



Е. Е. Мешков

воздух. Давление в облаке и вокруг него быстро выравнивается, поэтому там, где выше температура, там ниже плотность (формула Менделеева–Клапейрона). Другими словами, облако взрыва на стадии подъема – это как бы всплывающий пустотелый пузырь.

Картина развития воздушно-ядерного взрыва иллюстрируется фотографией, взятой из Интернета, рис. 1.

Численное описание этих процессов представляет собой не такую уж простую задачу (особенно в те далекие времена, когда вычислительная техника была маломощной). В лучшем случае, картина течения двумерная и сопровождается интенсивным вращением воздушных потоков. При нескольких близких взрывах картина течения будет трехмерной, а взаимодействие облаков будет весьма и весьма не тривиальным.

Аналитические методы решения задачи эволюции облаков взрывов тем более буксуют из-за ее непомерной сложности. Можно ли вообще каким-либо иным способом получить решение и найти ключевые закономерности, например, определить момент образования тороида (возникновение дырки от бублика), зависимости большого и малого радиусов тороида и высоты подъема от времени? Это в случае уединенного взрыва. А в случае нескольких взрывов – описать полную картину взаимодействия облаков? Да, возможно, и ключ для решения задачи находится в области физического подобия явлений, сопровождающих эволюцию облака ядерного взрыва и подъема воздушного пузыря в воде. Собственно, ключевые элементы этой идеи содержатся всего в паре достаточно простых утверждений:

а) на начальном этапе облако взрыва быстро превращается в пустотелый пузырь, который далее всплывает в поле тяжести;

б) движение воздуха происходит со скоростями много меньшими скорости звука, что говорит о его слабой сжимаемости.

Первая идея позволяет имитировать явления, используя газовые модели малого размера, и пересчитывать картину движения с модели на натурные условия. Вторая идея позволяет заменить горячий воздух обычным воздухом в модельном опыте, а окружающую ядерный взрыв атмосферу заменить обычной водой. Так для экспериментирования гораздо удобней, хотя бы с точки зрения регистрации течения обыч-



Рис. 1. Типичная картина подъема облака ядерного взрыва

ной киносъемкой. Вот и все. В целом, физическое подобие между столь разномасштабными явлениями найдено. Было также примерно понятно, как осуществить искомое моделирование, хотя постановка модельного эксперимента – это отдельная «песня».

В жизни все происходило несколько сложнее. Были горячие споры: вода ведь много плотнее воздуха. Где же здесь

подобие? На границе воздух–вода есть поверхностное натяжение, чего уж точно нет в облаке ядерного взрыва. Было показано, что для моделирования пространственной динамики абсолютное значение плотности не играет роли. Выполнены оценки факторов, нарушающих общее подобие течений, и предложены способы их устранения. Главной рекомендацией явилось требование использования пузырей возможно более крупных размеров. Тогда роль поверхностного натяжения и вязкости становится вторичной и может не приниматься во внимание. При этом задача о нескольких взрывах чуть-чуть сложнее с точки зрения экспериментального моделирования.

То, что рассказано выше, это, так сказать, идейная сторона вопроса. Но как это все осуществить и кто сможет это сделать? Здесь следует поблагодарить судьбу, которая в лице наших известных физиков и руководителей Ю. А. Романова и А. С. Козырева познакомила меня с уникальной личностью, физиком, художником и поэтом – Евгением Евграфовичем Мешковым, далее просто Женей.

Немного о нем. На начало нашего знакомства, в 1970-х гг., восходила звезда известности этого ученого. Его именем, что в науке происходит не так уж часто, была названа неустойчивость определенного вида, возникающая в ударно-волновых газодинамических течениях, – неустойчивость Мешкова–Рихтмайера. Много позже этих событий при взаимодействии с сотрудниками Лос-Аламосской национальной лаборатории (ЛАНЛ) США мне посчастливилось услышать историю открытия персоны Мешкова западными учеными.

Дело было так... У теоретиков в ЛАНЛ шел научный семинар, где обсуждался вопрос об устойчивости газодинамических течений при прохождении ударной волны через границу разноплотных сред. Для собравшихся это был далеко не праздный вопрос. Решения не было.

Существовали разные, даже взаимоисключающие версии. И тут Стиллман (Дэн Стиллман – сотрудник ЛАНЛ, тогда он отвечал в Лос-Аламосе за анализ публикаций сотрудников ядерных лабораторий СССР) рассказал о недавно прочитанной им экспериментальной работе Мешкова, которая однозначно и убедительно ставила точки над всеми буквами и говорила о неустойчивости течения независимо от направления движения ударной волны. С легкой руки ЛАНЛ эта неустойчивость обрела имя Мешкова, что утвердилось в мировом научном сообществе.

Внешне Женя выглядел тогда, да впрочем и сейчас, по прошествии около сорока лет, подтянутым, спортивным, с густой шевелюрой вьющихся волос. Сочинял стихи и писал картины маслом. Картины, кстати, очень даже неплохие. Он щедро дарил их друзьям и знакомым. Я знаю, что они украшают жизнь людям и в России, и в Штатах, и во Франции. С приобщением Жени к ареопагу классиков были связаны и курьезные случаи. Встречаясь с ним, некоторые зарубежные ученые изумлялись: «Как, Вы еще живы?» – вопрошали некоторые, свято полагая, что классики (подобно Галилею или Ньютону) должны уж давно почить в бозе. А этот жив-здоров. Так-то, знай наших!

Вот к такому уникаму я был адресован с задачей о лабораторном (бытовом) моделировании апокалиптических явлений. Классик, однако, оказался нормальным человеком, без тени зазнайства, по-настоящему увлеченным наукой. С ним легко. Он с энтузиазмом рассматривает любые научные идеи, даже самые бредовые. При этом происходит изобретательный поиск возможностей реализации идеи в эксперименте, а не поиск отговорок – как бы этого не делать. Женя – удивительно конструктивен. При этом он феноменальный фантазер. Достаточно упомянуть его предложение по увеличению всхожести семян пшеницы после воздействия на них ударной волной; или стерилизацию медицинского инструмента взрывом гремучей смеси (и ведь стерилизовали!), или уборку картофеля множественными взрывами все той же смеси.

Возвращаемся к нашей задаче о моделировании динамики воздушного ядерного взрыва. При ее обсуждении на квартире у Мешкова быстро отказались от взрывных способов создания пузыря в моделирующем эксперименте – слишком громко и к тому же, как показывает теория, пузыри, созданные таким способом, будут сильно пульсировать, что вредно для моделирования. Думали изготовить тонкую стеклянную колбу в

виде сферы, опустить ее под воду и разбить стеклянную оболочку. Освободившийся при этом пузырь будет беспрепятственно всплывать подобно облаку ядерного взрыва. Однако и это не хорошо. Осколки стекла – не подарок, да и процесс разрушения стеклянной оболочки и высвобождения воздуха может оказаться длительным и поэтому не приемлемым. Не симпатично. Было рассмотрено множество и других вариантов.

Удачная идея пришла спонтанно, как плод коллективного разума и здравого смысла, ярко продемонстрировавшая способность Жени организовать мозговой штурм. Давайте надуем большой резиновый шарик, поместим его под воду, проткнем иголкой оболочку, резинка съжмется и не будет препятствовать всплытию воздушного пузыря. Вот и все.

Нет, не все! Если формировать воздушный шар диаметром, хотя бы 30 см, что достаточно для моделирования, то под водой на него будет действовать выталкивающая Архимедова сила в 15 кг. Никакая резинка не выдержит. Тогда давайте поместим его в тонкую капроновую авоську, которая возьмет на себя всю силу Архимеда, предложил Женя. Уже смотрится: тут тебе ни взрывов, ни битого стекла. Успеет ли резиновая оболочка быстро съжмется и не мешать подъему? Проверили, проткнув шарик перед кинокамерой, работающей с удвоенной частотой кадров. Результат убедителен: на одном кадре отчетливо виден сферический шарик, а на следующем за ним – маленькая резиновая тряпочка! Значит, время устранения оболочки составило около 0,01 с. Характерное же время подъема шарика в поле тяжести на высоту, равную его радиусу в 15 см, составляет 0,1 с. Это означает, что выбранный простой способ экспериментирования обеспечивает достаточно быстрое формирование исходного пузыря сферической формы, а авоська и сжавшаяся резиновая оболочка останутся внизу, не будут оказывать влияния на движение пузыря и моделирование будет представительным.

Весь этот изобретательский процесс происходил в течение одного-двух часов. Напоследок Женя предложил: «Давай попробуем провести этот эксперимент в бытовых условиях с пузырем, пусть даже значительно меньшего размера. Посмотрим, что получится». Надули шарик диаметром около 3–5 см, налили воду в ванну доверху, опустили шарик ко дну и проткнули иголкой. Процесс протекал быстро, киносъемка не делалась (канителью обрабатывать пленку, а видеоаппаратура еще не была изобретена).

Зато глаза зафиксировали конечную фазу – выход пузырей на поверхность. Благодаря поверхностному натяжению первоначальный сферический пузырь разбился на 5–10 более мелких пузырей, расположенных равномерно по кругу. Это указывало на то, что значительно более крупный пузырь таки превратится в тороидальный бублик, что и является критическим признаком состоятельности экспериментального моделирования. Проведенная на кухне и в ванной комнате научная сессия фактически полностью сформулировала облик искомого модельного эксперимента. Дело за малым – осуществить убедительную демонстрацию.

Надо сказать, что в научной литературе на тот момент времени не было публикаций об экспериментах с такими крупными пузырями (выталкивающая сила в 1 пуд!). В основном, экспериментальные работы касались деформации и динамики подъема пузырьков сравнительно малого размера. Образование и подъем тороида никто не наблюдал (да еще с прикладными целями моделирования). Мы вообще-то волновались. Вдруг что-то пропустили и все будет не так, как мы себе это нарисовали.

Женя договорился с администрацией городского бассейна, и нам позволили там провести опыты, так как нужна достаточно большая глубина, чтобы исключить влияние поверхности раздела вода–воздух на движение всплывающего пузыря. В команду энтузиастов вошли экспериментаторы и теоретики: И. Г. Жидов, Е. Е. Мешков, В. В. Попов, В. Г. Рогачев А. И. Толшмяков, серьезные, вроде, люди. Достали уйму детских шариков, тонкие капроновые авоськи, длинную палку с тонкой иглой на конце, чтобы дистанционно без лишних возмущений протыкать шарики.

Позаимствовали у спортсменов связку гантелей, прикрепили ее веревкой к авоське, в которой помещен надутый детский резиновый шарик диаметром около 30 см. Картинка экспериментального устройства схематично изображена на рис. 2.

После того, как все было собрано, требовалось некоторое время, чтобы вода в бассейне успокоилась. Все с напряжением ждали момента истины. И он наступил. Женя издали умело проткнул детский шарик и процесс пошел. Я с волнением наблюдал за ним, делая киносъемку любительской кинокамерой. Очень быстро сферический пузырь трансформировался в тороидальное кольцо – бублик, состоящий из множества компактно расположенных пузырьков, интенсивно

вращающихся вокруг круговой оси тороида. Хорошо была видна дырка от бублика. Тороид поднимался, его большой радиус увеличивался и в конце концов он вышел на поверхность. Вся команда была невероятно довольна. Получилось!

Картина подъема и деформации пузыря (то, что мы наблюдали) иллюстрируется фотографиями киносъемки на рис. 3 и 4.

Предсказание оправдалось. Последующая обработка кинопленок показала справедливость тезиса о представительности и правильности предложенного метода моделирования на количественном уровне.

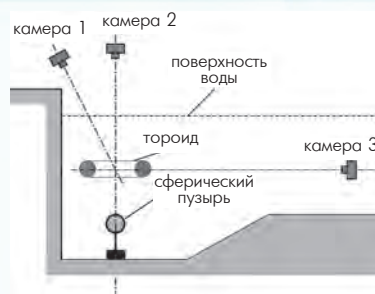


Рис. 2. Схема эксперимента

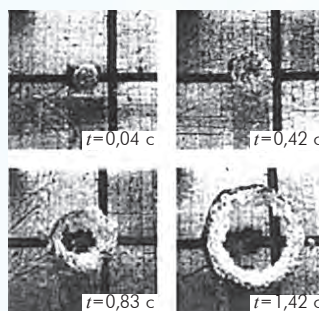


Рис. 3. Вид сверху



Рис. 4. Вид сбоку

Позже мы провели своеобразный психологический тест. Показали серьезным специалистам фотографии всплывающего пузыря в бассейне (вид сверху), выдавая их за опубликованные зарубежные данные аэрофотосъемки воздушного ядерного взрыва. Поверили без вопросов. И никто не поинтересовался, почему поверхность Земли расчерчена квадратиками (а это – кафельная плитка в бассейне); и что это такое черное видно на Земле (а это – тяжелые гантели из спортивного зала). Это еще одно, пусть и эмоциональное, подтверждение представительности предложенного метода моделирования.

Результаты эксперимента в бассейне были опубликованы в научном журнале ПМиТФ, 1977 г., вып. 3.

РОГАЧЕВ Владимир Григорьевич – советник при дирекции, заместитель директора ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, лауреат премии Правительства РФ