



## КАЖУЩИЕСЯ ПАРАДОКСЫ В ГИДРАВЛИКЕ\*

*Н. Б. Ковылов*

Саратовский государственный университет

Статья посвящена описанию простых явлений в гидравлике, для объяснения которых необходимо привлекать законы Ньютона, Архимеда и Паскаля. Описанию этих явлений в базовых курсах общей физики уделено недостаточно внимания. Статья может быть полезна молодым учителям для повышения интереса учащихся к изучению физики.

*Ключевые слова:* Гидростатика, гидродинамика, плавание, инерция, давление, гидравлический удар.

Когда мне предложили выступить перед старшими школьниками, участниками традиционной школы «Нелинейные дни для молодых» (организатор – факультет нелинейных процессов СГУ), я определил свою задачу следующим образом: показать молодёжи на возможно более простом примере путь познания в сфере естественных наук. Траектория этого познания проходит через наблюдение явления, планирование и постановку опытов для достоверного установления связей и закономерностей между действующими факторами, после чего или открывается новый закон, или уточняется известный закон, или находятся новые применения данного закона. Вот здесь и могут пригодиться снятые более для развлечения внука видеоролики с «кухонными» экспериментами, в которых наблюдались не совсем объяснимые эффекты. «Действующими лицами» опытов стали обыкновенная вода, детские игрушки и какая-то посуда.

Сначала сломанный грузовик был превращён в контейнеровоз, который проходил краш-тест. Положение груза на контейнеровозе до и после столкно-

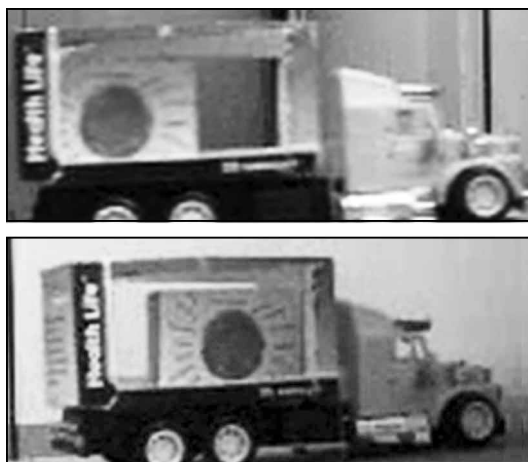


Рис. 1. Проявление инерции незакрепленного груза: *а* – до удара, *б* – после удара

\*Статья написана по материалам лекции, прочитанной на Школе «Нелинейные дни в Саратове для молодых-2014». Саратов, 17–21.10.2014, 26–27.11.2014.



Рис. 2. Отклонение поплавка: *a* – при разгоне, *b* – при торможении

вения показано на рис. 1. Результат вполне предсказуем в силу закона инерции, и аудитория согласилась, что в этом опыте ничего необычного нет.

Затем в прозрачную пластиковую посуду был помещен пробковый поплавок на поводке, прикрепленном ко дну. После заполнения водой завинчивалась крышка, а всё сооружение клеивалось в устойчивое основание для удобства наблюдения. И вот при ударе этого сооружения о препятствие, когда все ожидали продолжения движения поплавка по инерции, он вдруг поплыл в противоположную (!?) сторону (рис. 2).

Обе части видеоролика смотрите по ссылке: <https://yadi.sk/i/cWB4yXapYv7dx>.

Парадокс? Вряд ли. Бесформенная, как мы знаем, движущаяся масса жидкости при торможении стремится сохранить состояние движения, но наталкивается на стенки сосуда. А теперь вообразите себя пассажиром битком набитого вагона. Кто при торможении будет сдавлен сильнее? Правильно, тот, позади которого находится большая масса. Так и с жидкостью. Давление у стенки будет больше, чем на удалении от нее. Попробуем пооперировать формулами. Представим себе, что цилиндрический сосуд высотой  $L$  заполнен жидкостью с плотностью  $\rho$  и его движение замедляется с постоянным ускорением  $a$ . На дно цилиндра площадью  $s$  будет действовать сила  $F$ , вызванная стремлением всей массы  $m$  жидкости сохранить состояние движения с прежней скоростью (второй закон Ньютона).

$$F_1 = ma = \rho Va = \rho Lsa. \quad (1)$$

В каждой точке, прилегающей ко дну, жидкость будет испытывать и распространять давление во всех направлениях

$$p_1 = \frac{F_1}{s} = \rho La. \quad (2)$$

На расстоянии  $\Delta L$  ото дна давление, очевидно, будет меньше:

$$p_2 = \frac{F_2}{s} = \rho(L - \Delta L)a. \quad (3)$$

Поэтому равнодействующая инерционных сил давления жидкости, действующих на поплавков, будет направлена ото дна, в то время как сила инерции поплавка направлена ко дну. Последнюю силу в данном случае можно не принимать во внимание, поскольку масса пробки (поплавок) много меньше массы вытесненной ею жидкости.

Попробуем видеоизменить опыт так, чтобы направление инерционных сил совпало с направлением сил тяготения. В прозрачную банку помещаем пластиковый чехол от «киндер-сюрприза», внутрь которого вклеен грузик, обеспечивающий отрицательную плавучесть получившемуся поплавку. В банку заливается вода до отказа, и навинчивается крышка. Теперь банку «роняем» с некоторой высоты и наблюдаем

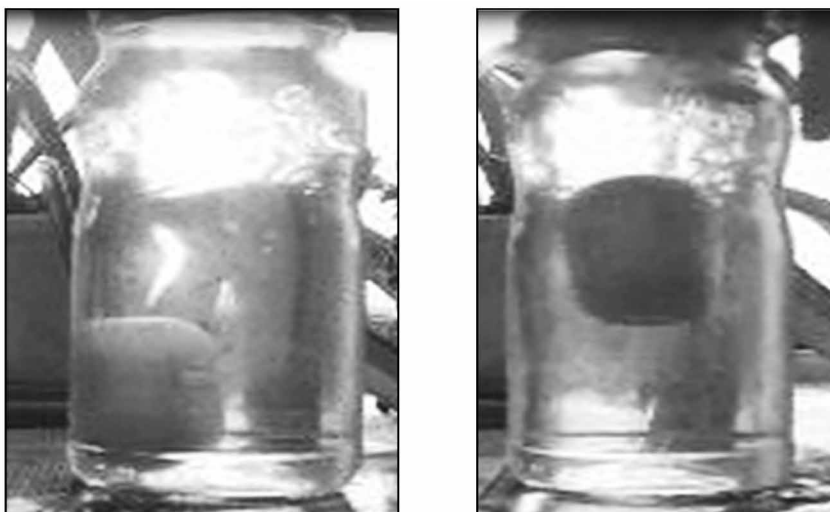


Рис. 3. «Прыгающий» поплавок: *а* – до удара, *б* – после удара

поведение поплавка. Он опять непослушен! Вместо того чтобы прижаться ко дну, он подпрыгивает вверх (рис. 3). Соответствующий видеоролик смотрим по ссылке: <https://yadi.sk/i/ziApF1MZWWaLr>.

У части слушателей данный опыт породил сомнения: а не упругость ли пластика подбрасывает поплавок? Чтобы проверить эту версию, выливаем воду и стучим пустой банкой с тем же поплавком по тому же месту. То, что наблюдается в «сухом» опыте, видно в следующем ролике: <https://yadi.sk/i/RuM5E8IUc8C6E>.

Прыжки еле заметны (даже в отсутствие сопротивления воды). А ведь вода оказывает большее сопротивление! Что-то мы здесь не учитываем, хотя вспомнили и закон Архимеда, и закон Ньютона. Кого же из гениев-физиков вспомнить? Да был же ещё физик, лучше всех знавший свойства жидкостей и газов – Паскаль. Именно закон Паскаля установил свойство несжимаемых жидкостей передавать давление *равномерно по всем направлениям*.

И есть одно обстоятельство, которое требует задержаться на рассмотрении этого случая. Опыт повторили, только в качестве поплавка взяли куриное яйцо, а плотность воды повысили для сохранения тех же условий плавания, растворив в ней поваренную соль. И что же? Наш поплавок почти не сдвинулся с места! Единственное отличие в условиях опыта – форма поплавка. Значит, причину различия надо искать в разнице поведения воды в обоих случаях. В первом случае кроме инерционных сил присутствуют силы упругости корпуса «киндер-сюрприза», который при ударе сминается, а затем, распрямляясь, слегка подбрасывает поплавок вверх. И тут же, за счет повышенного у дна давления, вода устремляется под поплавок. В этом случае, как и при не совсем запол-



Рис. 4. Фонтанирующий «трубопровод» (удар о стенку справа)

ненном сосуде, происходит перемещение масс воды, которое увеличивает динамический эффект. В случае с яйцом перемещения не происходит, так как отсутствует эффект упругой деформации, способствующий возникновению этого эффекта. И, конечно, эффект вертикального скачка этих поплавков менее заметен, так как массы поплавков и вытесненной ими жидкости (а соответственно, и силы инерции) практически равны.

Если смотреть глубже, совместное действие гидростатических и инерционных сил, приложенных к жидкости, заполняющей объем, ограничивающий ее, приводит к эффекту, похожему на волновой процесс. Опыт с горизонтальной цилиндрической ёмкостью, заполненной водой, показывает фонтанчики из двух одинаковых отверстий в начале и в конце ёмкости (рис.4). Соответствующий видеоролик можно посмотреть в Интернете по ссылке: <https://yadi.sk/i/J1ouc33bc8DAu>.

Обратите внимание, что наш житейский опыт подсказывает, что вода должна выплёскиваться с большим напором через переднее отверстие, а происходит наоборот. В чем дело? Любая поисковая система, если мы интересуемся поведением потока жидкости в трубе при её торможении, выводит нас на явление гидравлического удара [1].

Исследовано оно было основателем отечественной аэро- и гидродинамики Н.Е. Жуковским в конце 19 века. В полностью заполненном движущейся жидкостью трубопроводе при изменении средней скорости потока от  $v_0$  до  $v_1$  за счет частичного перекрытия потока жидкости задвижкой в жидкости возникает волна с превышением давления, определяемым формулой

$$D = \rho(v_0 - v_1)V_{\dot{a}},$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, а  $V_{\dot{a}}$  – скорость распространения волны вдоль потока. Она находится в прямой зависимости от сжимаемости жидкости, упругости стенок трубы и её диаметра [2].

С гидроударами приходится профессионально бороться работникам трубопроводного транспорта, в частности, водопроводчикам. Любая поисковая система выдаст вам множество материалов на тему гидроудара. Но наиболее интересным примером использования этого явления в технике является гидротаран (рис. 5). С помощью этого устройства производится подкачка воды в водонапорные башни. Кроме того, используя течение реки, можно устроить поливальную станцию без использования электроэнергии или горючего для полива огородов – есть ссылки на пару патентов на эту тему. И совсем не хочется обойти стороной ошибочно называемые

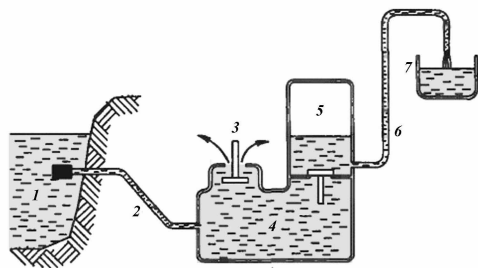


Рис. 5. Устройство для подъема воды (гидротаран): 1 – водоём, 3 – отсекающий клапан, 4 – обратный клапан, 7 – водонапорная ёмкость

гидроударами аварийные ситуации при попадании воды в цилиндры автомобильных двигателей. На самом деле, в этих случаях двигателю безразлично, попадет в цилиндр вода или металлический предмет. Вот только для попадания воды достаточно неопытному водителю заехать поглубже в водоём, а для попадания куска металла в цилиндр без разборки мотора и помощи механика не обойтись.

С чувством большого удовлетворения я воспринял и десятки вопросов после доклада, заданные школьниками, и правоту авторитетных преподавателей физики, которые сетуют на малое количество хрестоматийных материалов, помогающих «почувствовать» работу физических законов в окружающей жизни. Убеждён, что интерес школьников к физике находится в прямой зависимости от количества иллюстративного материала, дающего строгую дополнительную информацию, по возможности, без формул, как бы странно это ни звучало.

### Библиографический список

1. 1.ru.wikipedia.org/гидроудар.
2. khd2.narod.ru/hydrodyn/rampump.htm

Поступила в редакцию 12.12.2014

## APPARENT PARADOXES IN HYDRAULICS

*N. B. Kovylov*

Saratov State University

The purpose of this article is to increase the interest of school students in General physics. For notice teacher it will help to illustrate Newton's laws, Archimed's law and Pascale's law by simple home experiments.

*Keywords:* Hydrostatics, hydrodynamics, swimming, inertia, pressure, hydraulic impact.

*Ковылов Николай Борисович* – окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского по специальности «радиофизика». Работал в Конструкторском бюро нефтяной и газовой промышленности (КБ НГП). В течение 17 лет занимался разработкой средств автоматики и измерительной техники в нефтедобывающей промышленности, главные из которых серийно выпускались для месторождений Западной Сибири и Саратовского региона. Ответственный исполнитель и главный конструктор: электронных влагомеров для нефти; государственного стандарта на диэлькометрический метод измерения электронными влагомерами; измерителя параметров нефтяных эмульсий; метода подтверждения безводности нефти и нефтепродуктов для целей метрологии. Имеет 5 авторских свидетельств и 2 патента на изобретения. Опубликовал монографию «Диэлькометрические нефтяные влагомеры» (в соавторстве с И.Ю. Клугманом, Саратов: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1969). Организатор, директор и научный руководитель Кустового информационно-вычислительного центра Производственного объединения «Саратовнефтегаз» (1980–1987). Главный конструктор бытовых отечественных видеоманитофонов «Электроника ВМ-32» и ВП-001 (конец 1980-х). После распада производства перешел полностью на научно-педагогическую работу.

Доцент кафедры нелинейной физики факультета нелинейных процессов (ФНП) Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского. Создал и развивает учебно-научную лабораторию «Электромагнитные явления». Читает лекции по курсам «Теоретическая электротехника» и «Основы электроники для компьютерщиков». Учебные пособия по этим курсам разработаны с учетом богатого практического опыта автора. Ведет лабораторные работы по электричеству и магнетизму на ФНП и практические занятия на ФКНИИТ. За время работы в СГУ как руководителем дипломных работ им выпущено более 45 специалистов.

В настоящее время активизирует поиск междисциплинарных связей, призванных объединить усилия специалистов в области физики и информатики с целью модернизации экспериментальных научных исследований и учебных работ.

410012 Саратов, Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail: nikolajj-kovylov@mail.ru

