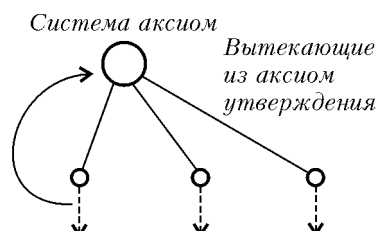


# Гидравлический удар

В. МАЙЕР

В 1952 ГОДУ СЕМИДЕСЯТИТРЕХЛЕТНИЙ АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН в письме к своему другу юности Морису Соловину пояснил, как он понимает суть научного познания. Свои мысли он проиллюстрировал схемой, которая изображена на рисунке 1. Исходными являются непосредственные данные



Совокупность непосредственно данных ощущений

Рис. 1

чувственного опыта. На их основе формулируется система аксиом или гипотез. Из нее выводятся умозаключения или следствия, которые проверяются экспериментом. Если следствия подтверждаются опытом, то гипотеза становится теорией, которая имеет определенную область применимости. Эйнштейн особое внимание обращал на то, что в научном познании логика работает в основном на этапе получения следствий из модели или теории. Переход от фактов к модели и от следствий к эксперименту относится, как он писал, к «внелогической (интуитивной) сфере».

Не надо думать, что цикл *факты* → *модель* → *следствия* → *эксперимент* относится исключительно к научному познанию. На самом деле, всякий успешно живущий в этом мире человек действует в соответствии с этим циклом. Чтобы далеко не ходить за примерами, напомним детективные романы, скажем Агаты Кристи, – вот где истинный учебник научного познания действительности! Они всегда начинаются с фактов. Второстепенные герои романов пытаются логически объяснить имеющиеся факты, но у них ничего хорошего не получается. Главные герои, вроде Эркюля Пуаро или мисс Марпл, ничем подобным не занимаются, но в какой-то момент интуитивно догадываются об истине. Они не спешат сообщить о своих догадках, пока не докажут их справедливость, зато охотно говорят о фактах, лежащих в их основе. Наконец, эти главные герои ставят следственный эксперимент, изобличающий преступника, т.е. подтверждающий следствия их умозрительной модели, и с этого момента справедливость интуитивной догадки оказывается доказанной.

В этой статье будет проиллюстрирован метод научного познания при решении реальной физической проблемы, а именно – известного явления разбивания бутылки с водой при кратковременном ударе по ее горлышку (см., например, статью Е.Ромишевского «Удивительная бутылка» в «Кванте» №1 за 2001 год). Нам кажется, что для читателей «Кванта» нет необходимости слишком «разжевывать» материал, поэтому мы просто изложим его, выделив этапы исследования в соответствии с циклом научного познания.

**Факты.** В качестве оборудования для эксперимента приготовьте поллитровую стеклянную бутылку с плавно сужающейся горловой частью, специальный молоток, матерчатую

перчатку и широкий сосуд. Практика показывает, что лучше всего использовать бутылку из-под пива из стекла коричневатого цвета. Молотком может служить деревянная киянка (столярный инструмент) размером 40 × 100 × 150 мм, на одну из рабочих поверхностей которой наклеена плотная резиновая накладка толщиной 2–4 мм; длина ручки киянки 350 мм. Более эффектен опыт с молотком меньших размеров. Например, мы использовали цилиндрический молоток из второпласта диаметром 36 мм и длиной 80 мм с деревянной ручкой длиной 210 мм – он и изображен ниже на фотографиях. Матерчатая перчатка предназначена для предохранения руки, держащей бутылку, от осколков стекла. В действительности вероятность того, что расколется часть бутылки, находящаяся в руке, очень мала. Широкий сосуд нужен для сбора воды и осколков стекла. Подойдет бытовый тазик из полимера поперечником около 30 см и глубиной 10 см. Очень удобен также полиэтиленовый мешок, сложенный так, чтобы получился плоский сосуд высотой 20–30 см.

**Опыт 1.** На левую руку наденьте перчатку, возьмите бутылку за горлышко и расположите ее над тазиком на высоте около полуметра. В правую руку возьмите молоток и резко, но не слишком сильно ударьте по горлышку бутылки. При этом бутылка остается целой. Опыт повторите несколько раз, чтобы убедиться в том, что разбить таким способом бутылку невозможно.

**Опыт 2.** В бутылку налейте воду так, чтобы до отверстия бутылки оставалось примерно 70 мм, и вновь ударьте по горлышку молотком. Бутылка немедленно разбивается!

Фотография описанного опыта представлена на рисунке 2. Вы видите (см. рис. 2,а), что дно бутылки оторвалось и из нее «вывалился» столб воды. Обратите внимание на полусферическую поверхность воды внутри бутылки – именно такую форму имеют поверхности жидкости в цилиндрическом смачиваемом сосуде в состоянии невесомости.

Понятно, что в опытах не всегда откалывается только дно бутылки – бутылка разламывается там, где находящаяся под водой стенка наименее прочна (см. рис. 2,б). Однако никогда излом не происходит вблизи поверхности воды в верхней части бутылки.

Представленные здесь фотографии получены следующим образом. Синхроконттакт лампы-вспышки соединен с парой нормально разомкнутых контактов, которые установлены над сосудом для сбора воды и осколков стекла. Один из экспериментаторов держит бутылку над контактами на высоте, определяемой временем задержки от удара до момента

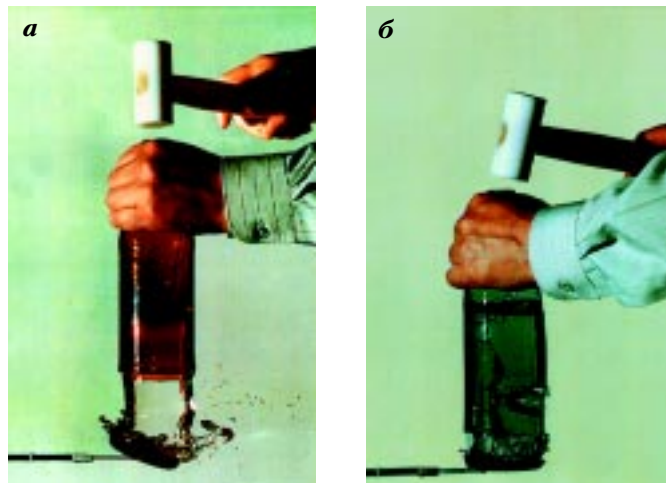


Рис. 2

фотографирования. Второй экспериментатор наводит фотоаппарат на резкость на бутылку, устанавливает выдержку «от руки», создает в помещении полумрак и открывает затвор фотоаппарата. Первый экспериментатор производит по бутылке удар, оторвавшееся дно замыкает синхроконттакты, происходит вспышка света, и второй экспериментатор отпускает затвор. Пленка экспонирована, можно отдавать на проявление и печать фотоснимков.

**Модель.** Попробуем объяснить обнаруженное явление. На рисунке 3 схематически изображены бутылка в виде цилиндра и молоток в форме свободно падающего на бутылку тела.

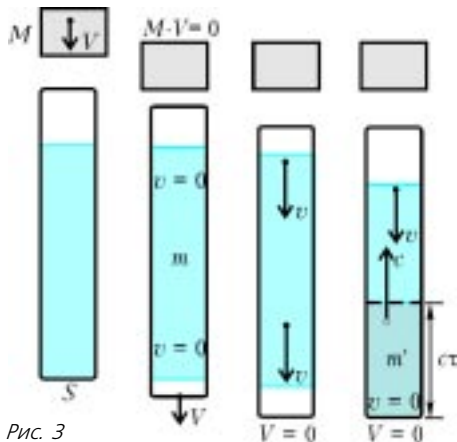


Рис. 3

В момент удара по горлышку импульс приобретает бутылка, а вода в ней на мгновение остается неподвижной. Затем бутылка прекращает движение, и атмосферное давление гонит воду в бутылке вниз. При ударе воды о дно за небольшое время  $\tau$  останавливается столб воды массой

$$m' = \rho S c \tau,$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $S$  – площадь дна бутылки,  $c$  – скорость распространения сжатия (т.е. скорость упругой волны или скорость звука) в воде. Если скорость столба воды в момент удара о дно составляла  $v$ , то дно получило импульс

$$m'v = f\tau = pS\tau,$$

где  $f$  – сила давления,  $p$  – давление на дно бутылки.

По закону Паскаля  $p$  – это давление во всем остановившемся объеме воды, которое действует не только на дно, но и на стенки бутылки в области сжатия воды. Сравнивая две предыдущие формулы, получаем, что давление в бутылке возрастает на величину

$$p = \rho c v.$$

Так как скорость звука в воде довольно велика ( $c = 1500$  м/с), то даже при сравнительно небольших скоростях движения воды давление в ней при внезапном торможении резко повышается, стекло не выдерживает и разрушается. Такое явление получило название *гидродинамического* или *гидравлического удара*.

**Следствия.** Для простоты будем считать массы молотка и бутылки одинаковыми и равными  $M$ , а взаимодействие их при ударе – упругим. Тогда по закону сохранения импульса после удара молотка по горлышку бутылки молоток останавливается, а бутылка приобретает скорость  $V$ , равную скорости молотка в момент удара (см. рис.3). Кинетическая энергия бутылки расходуется на создание и увеличение полости насыщенного пара вблизи ее дна, т.е. на работу против сил атмосферного давления. Когда бутылка останавливается, то же самое атмосферное давление гонит столб

воды к дну бутылки, а насыщенный пар конденсируется. При этом по закону сохранения энергии  $MV^2/2 = mv^2/2$  столб воды приобретает скорость  $v = \sqrt{M/m} V$ . Подставляя это значение в формулу для давления, получаем

$$p = \rho c \sqrt{\frac{M}{m}} V.$$

Для оценки скорости молотка при ударе допустим, что он свободно падает с высоты  $h \approx 0,5$  м, тогда  $V = \sqrt{2gh} \approx 3$  м/с. Получаем, что при гидравлическом ударе давление в бутылке возрастает на

$$p = 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 1,5 \cdot 10^3 \text{ м/с} \cdot 3 \text{ м/с} = 45 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Иными словами, кратковременно давление в бутылке в 45 раз превосходит атмосферное! Конечно же, бутылочное стекло столь значительного роста давления выдержать не в состоянии.

Чтобы бутылка при таких чудовищных условиях не разрушилась, нужно как-то предотвратить внезапный рост давления в воде. Разумно предположить, что если в воду поместить легко сжимаемый предмет, то возникающая при гидродинамическом ударе волна сжатия сожмет этот предмет, давление в воде возрастет незначительно и стекло не разрушится.

**Эксперимент.** Чтобы экспериментально обосновать построенную модель явления, проверим ее следствия. Вначале подтвердим, что при ударе молотка по горлышку столб воды в самом деле отрывается от дна бутылки.

**Опыт 3.** Наполнив бутылку водой, как в опыте 2, несколько раз несильно ударьте по ее горлышку молотком, постепенно увеличивая силу удара. При этом вначале слышен лишь глухой звук удара, а затем появляется резкий звонкий звук, как будто по стеклу после глухого удара молотком ударяет металл. Повторите опыт с пустой бутылкой и убедитесь, что ничего подобного не происходит. Следовательно, звонкий звук производит столб воды в бутылке, ударяясь о ее дно. Но чтобы это произошло, вначале вода должна оторваться от дна бутылки.

Теперь покажем, что бутылка с водой разрушается, если скорость молотка, масса которого примерно равна массе бутылки, в момент удара действительно составляет приблизительно 3 м/с. Для этого можно непосредственно измерить скорость молотка при ударе, а можно решить проблему и проще.

**Опыт 4.** Попробуйте, слегка держась за конец рукоятки, без усилий направлять свободно падающий молоток на горлышко пустой бутылки. После небольшой тренировки у вас получится то, что нужно. Затем возьмите бутылку с водой и начните «бросать» на ее горлышко молоток, постепенно увеличивая высоту бросания. Вы обнаружите, что бутылка разбивается, когда на ее горлышко молоток падает с высоты около полуметра.

Теперь подготовьте оборудование к новому опыту. Возьмите резиновый напальчник диаметром 20 мм и длиной 70 мм, гвоздь диаметром 4 мм и длиной 60 мм, несколько металлических гаек с диаметром отверстия 5–6 мм, поролон и прочную нить. Из напальчника сделайте герметичный резиновый мешок с воздухом, тонущий в воде. Для этого оберните гвоздь поролоном, закрепите слой поролона нитью, введите гвоздь с поролоном внутрь напальчника и слегка перевяжите его отверстие. Погрузите мешочек в стакан с водой и, если он плавает, добавьте в него металлические гайки так, чтобы он начал тонуть. Герметично перевяжите отверстие напальчника нитью. Прибор сделан правильно, если мешочек наполнен воздухом и при смачивании водой свободно

проходит в горлышко бутылки (именно для этого нужен гвоздь, иначе проталкивание мешочка потребует определенного времени).

**Опыт 5.** Приготовьте бутылку с водой, как в опыте 2, и погрузите в нее резиновый мешочек с воздухом так, чтобы он висел на нити вблизи дна бутылки, но не касался его. Ударьте по горлышку молотком – бутылка останется целой!

Объяснить это явление можно тем, что при гидравлическом ударе воздух в резиновом мешочке сжимается, поэтому давление в воде повышается не настолько, чтобы разрушить стекло.

5 августа 2005 года скончался Анатолий Иванович Ларкин, один из самых самобытных и выдающихся физиков-теоретиков настоящего времени. Он не занимал высоких постов, не редактировал журналы, редко выступал на конференциях. Его сильнейшее влияние на мировое сообщество физиков почти целиком определяется написанными им статьями, в которых освещались «темные углы» и определялись многие новые направления развития науки.

Анатолий Иванович Ларкин родился 14 октября 1932 года в Коломне. Научная биография академика РАН, заведующего сектором Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау, профессора Московского государственного университета, профессора физики и члена Института теоретической физики университета Миннесоты (США), лауреата престижных международных премий – Хьюлетт-Паккард, Ф. Лондона, Л. Онсагера, Дж. Бардина – началась в Москве более полувека назад. Поступив в Московский инженерно-физический институт, он учился физике у таких блестящих учителей, как И. Е. Тамм, М. А. Леонтович, И. Я. Померанчук, А. Б. Мигдал. Свою первую научную работу он выполнил под руководством А. Д. Сахарова.

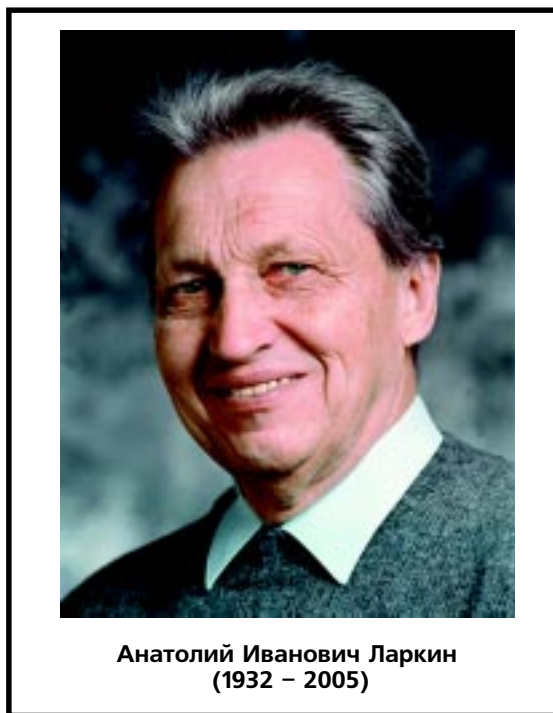
Научное творчество А. И. Ларкина составляет богатейшую картину современной физики конденсированного состояния. Начав с проблем ядерной физики и теории частиц, он постепенно переходит к теории магнитных и неупорядоченных систем, вплотную подходит к решению загадки фазовых переходов второго рода. Монументален его вклад в физику сверхпроводников, в его работах сформулированы основы современной теории одномерных электронных систем. В конце XX века происходит существенный прогресс в понимании физики неупорядоченных проводников, А. И. Ларкин и здесь становится общепризнанным лидером, закладывает основы таких новых направлений, как слабая локализация, мезоскопика и квантовый хаос.

Каждому, кому посчастливилось работать с Анатолием Ивановичем, известно возникавшее при этом чувство восторга овладения новым знанием. До последних дней он оставался желанным соавтором для большого числа коллег – как именитых, так и молодых. А. И. Ларкин обладал редкой физической интуицией. Его не часто можно было увидеть пишущим формулы – задачи решались в уме. Он блестяще знал и использовал самые современные методы теоретической физики и математики, но на его письменном столе не было стоп исписанной бумаги. О том, чем он сейчас занят, говорила лишь испещренная отрывками обсуждаемых с разными соавторами задач доска в его кабинете.

Анатолий Иванович был удивительно доброжелательным человеком. Всем было хорошо известно, что у него нет барьера в отношении задающего вопрос и он готов обсуждать научную проблему одинаково подробно и с академиком, и с аспирантом. А на семинарах он чаще молчал, выступая только тогда, когда хотел защитить, обычно молодого, докладчика, на которого уж очень активно «нападала» аудитория.

**Опыт 6.** Повторите предыдущий опыт несколько раз, располагая мешочек с воздухом на разной высоте в воде, затем за нить удалите мешочек из бутылки и вновь произведите удар – бутылка немедленно расколется на части!

Итак, серия опытов со всей убедительностью на качественном уровне подтверждает следствия теоретической модели, следовательно, физическая сущность явления действительно заключается в гидродинамическом ударе воды внутри бутылки. Значит ли это, что мы полностью исчерпали проблему? Разумеется нет, и вы сами сможете сообразить, как продолжить исследование.



**Анатолий Иванович Ларкин  
(1932 – 2005)**

Научные достижения А. И. Ларкина неразрывно связаны в его жизни с воспитанием молодых физиков-теоретиков, его талант Учителя привел в теоретическую физику многих способных людей. Однажды на вопрос о том, по какому принципу он отбирает учеников и чем руководствуется при выборе задачи для первой научной работы студента, Анатолий Иванович ответил: «Студенты приходят ко мне сами. Я беру их не очень часто, так чтобы на всех хватало времени... Первую же научную проблему я подбираю под ученика, когда пойму, к чему он склонен. Если ему нравится размышлять, то и задачку я подбираю такую, где нужно придумать что-то новое. Если же он больше склонен к сложным вычислениям, то я подбираю задачу, соответствующую его математическим способностям. А затем начинается совместный путь познания».

Человечность, доброта, обаяние Анатолия Ивановича и радость участия в совместном творчестве притягивали к нему людей с разными характерами и талантами. А. И. Ларкин оставил своим ученикам и сотрудникам завершать десятков уже начатых, благодаря его идеям, исследований. Поэтому еще долго будут появляться работы, подписанные его именем.

*А. А. Варламов, С. С. Кротов,  
Ю. А. Осипьян, Д. Е. Хмельницкий*