



Майер Валерий Вильгельмович
Доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и дидактики физики Глазовского государственного педагогического института.
Вараксина Екатерина Ивановна
Кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики и дидактики физики Глазовского государственного педагогического института.

Экспериментальное исследование сифона жидкостного обыкновенного

Нет ничего проще обычного сифона – это всего лишь трубка, по которой жидкость перетекает из верхнего сосуда в нижний. Но действие сифона связано с фундаментальными свойствами газов и жидкостей, находящихся на поверхности Земли: атмосферным и гидростатическим давлением, текучестью, прочностью на разрыв. Поэтому выяснение физических причин сифонного эффекта не так просто, как это кажется на первый взгляд. Предлагаем вам познакомиться с разными подходами к объяснению принципа действия сифона и в самостоятельном экспериментальном исследовании, не апеллируя к авторитетам, установить истину.

1. Изготовление сифона

На подъёмный столик поставьте широкий сосуд с водой и рядом со столиком расположите стакан. Возьмите резиновый или силиконовый шланг внутренним диаметром не менее 5 мм и целиком погрузите его в сосуд так, чтобы он полностью заполнился водой. Один конец шланга придерживайте рукой, чтобы он остался под поверхностью воды в сосуде. Второй конец под водой перекройте пальцем, достаньте из сосуда (рис. 1 *а*), расположите над стаканом ниже уровня воды в сосуде и уберите палец. При этом из открытого конца шланга начинает течь вода (рис. 1 *б*). Вода перетекает из верхнего сосуда в нижний до тех пор, пока не обнажится верхний конец шланга. Изготовленное вами устройство называется сифоном и используется для переливания жидкости из сосудов, которые нельзя наклонять.

Повторите опыт, взяв шланг длиной около двух метров. Постепенно погружайте шланг в воду, располагая его в широком сосуде

кольцами так, чтобы в нём не оставалось воздушных пузырей. Когда шланг полностью заполнится водой, крепко пережмите его конец пальцами и, доставая шланг с водой из сосуда, перебросьте его через кронштейн штатива, находящийся на высоте около метра над столом. Как только зажатый конец шланга окажется ниже уровня воды в сосуде, откройте его, и вы обнаружите, что сифон вновь заработал (рис. 1 *в*)!



Рис. 1

2. Принцип действия сифона

Что же гонит воду из сосуда вверх на довольно значительную высоту, обеспечивая работу сифона?

В условиях опыта, изображённого на рис. 1 б, один конец шланга погрузите в верхний сосуд с водой, а второй – поместите над стаканом ниже уровня воды в сосуде. Сжав резиновую грушу, соедините её с шлангом и, снижая давление на грушу, вытяните воздух из шланга. При этом вода из сосуда перетекает в грушу (рис. 2 *а*). Отсоединив грушу от шланга, убедитесь, что сифон начал действовать. Значит, работу сифона обеспечивает уменьшение давления в шланге.

Представьте сифон, состоящий из трубки, полностью заполненной жидкостью, нижний конец которой перекрыт заслонкой (рис. 2 *б*). Давление на поверхность жидкости равно атмосферному. Такое же давление будет внутри сифона на уровне воды в сосуде. Но на уровне заслонки давление в сифоне больше атмосферного на величину $p = \rho gh$, где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, h – высота столба жидкости между заслонкой и уровнем воды в сосуде. Значит, на заслонку действует направленная вниз сила $f = pS = \rho ghS$, где S – площадь поперечного сечения сифона.

Если заслонку убрать, то эта сила давления окажется приложенной к нижним слоям жидкости. Так как жидкость плохо растяжима и текуча, то она начинает вытекать из открытого конца сифона. Таким образом, действие сифона объясняется гидростатическим давлением в жидкости и сохранением её целостности при растяжении.

Из приведённого объяснения следует, что выше уровня воды в сосуде давление в сифоне должно быть меньше атмосферного. Чтобы подтвердить это следствие теоретического объяснения экспериментом, нужно уметь оценивать давление жидкости в сифоне.

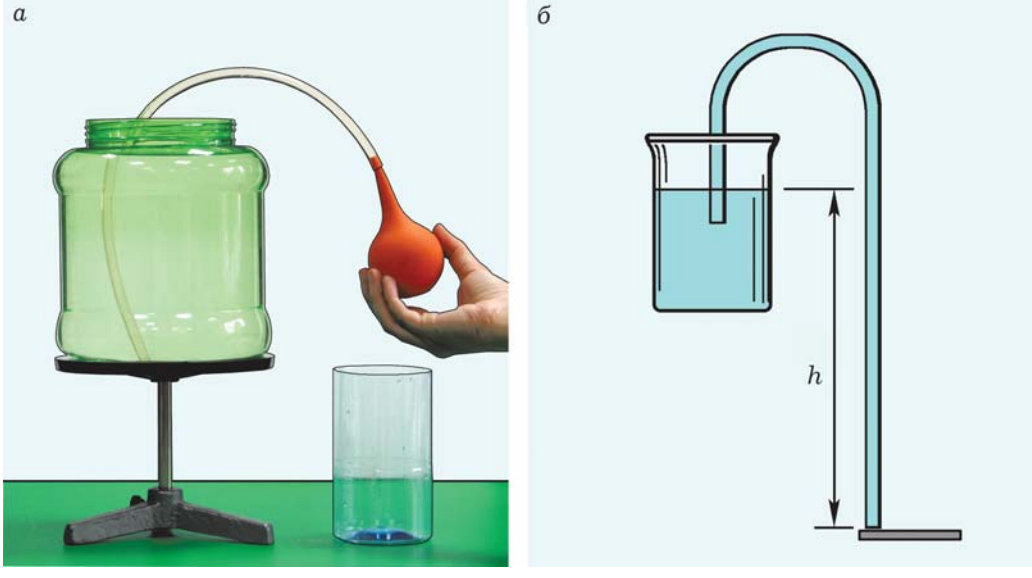


Рис. 2

3. Датчик давления

Из пластиковой бутылки ёмкостью 0,25 л изготовьте небольшую воронку. Край воронки обработайте мелким напильником или шкуркой так, чтобы он не был острым. Приготовьте резиновое колечко, вырезав его из старой велосипедной камеры. Хорошенько раздуйте воздушный шарик так, чтобы резина, из которой он сделан, стала как можно более мягкой. На широкое отверстие воронки натяните кусок мягкой резины и закрепите его резиновым колечком (рис. 3 *а*).

В оставшейся от бутылки крышке шилом и напильниками проделайте круглое отверстие и вставьте в него конец силиконового или резинового шланга внешним диаметром 6 – 8 мм (рис. 3 *б*). Соединение шланга с крышкой должно быть герметичным. Наверните крышку со шлангом на воронку – у вас получился датчик давления (рис. 3 *в*). Убедитесь в этом, соединив конец шланга со слегка сжатой резиновой грушей: при отпускании её плёнка втягивается внутрь воронки, при нажатии на грушу – выпячивается наружу.

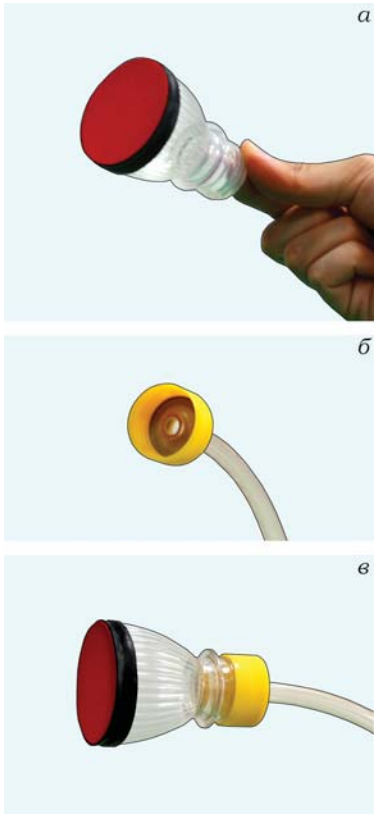


Рис. 3

4. Экспериментальное обоснование принципа действия сифона

Отверните от датчика давления крышку со шлангом и, поставив его резиновой плёнкой на ровную поверхность, доверху заполните водой. Наверните на датчик крышку со шлангом, в шприц наберите воду и, пользуясь им, до конца заполните водой шланг. Отверстие шланга перекройте пальцем, отпустите шланг в широкой сосуд с водой и уберите палец.

Опустите датчик давления ниже уровня воды в сосуде, и вы увидите, что его резиновая плёнка выпукла наружу (рис. 4 *а*). Расположите датчик на уровне воды в сосуде – плёнка становится совершенно плоской (рис. 4 *б*). Подняв датчик давления выше уровня воды в сосуде, вы обнаружите, что плёнка прогнулась внутрь воронки (рис. 4 *в*).

Таким образом, проделанные опыты показывают, что давление в жидкости внутри сифона на уровне воды в сосуде равно атмосферному, выше этого уровня меньше атмосферного и ниже – больше атмосферного [1, с. 334 – 335].

А вот известный физик и автор знаменитого вузовского учебника физики Р.В. Поль категорически не согласен с приведённым выше объ-

яснением и прямо заявляет: «Принцип действия сифона ничего общего не имеет с давлением воздуха»! В подтверждение он ссылается на опыт с цепочкой, перекинутой через легкоподвижный блок, концы которой лежат в стаканах: если один из стаканов поднять, то цепочка начинает перетекать во второй [2, с. 185 – 187].

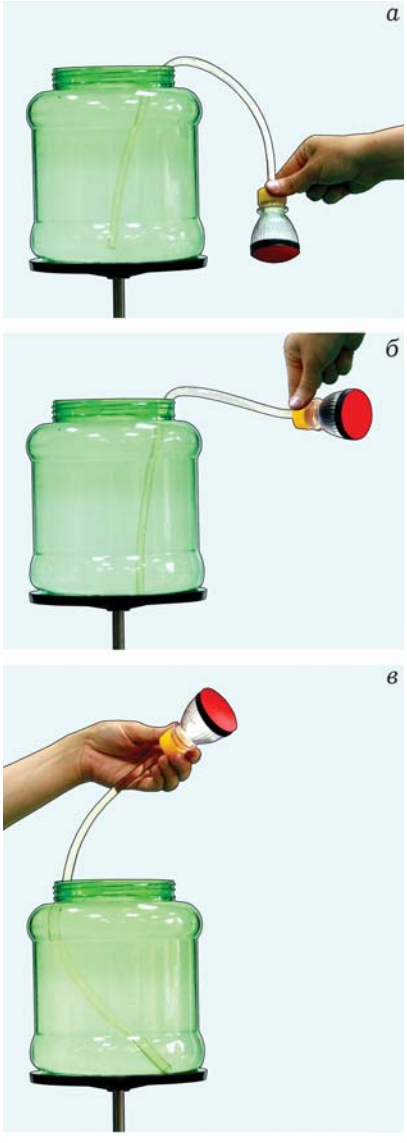


Рис. 4



Рис. 5

Вы без труда повторите этот опыт, если посмотрите на рис. 5. Понятно, что цепочку в нижний стакан перетягивает та её часть, которая находится между верхним и нижним стаканами. Точно так же столб воды в длинном колене сифона перетягивает воду, находящуюся в коротком, поскольку вода обладает значительной прочностью на разрыв. Если же столб воды в сифоне разорвать, то действие сифона прекратится.

Последнее утверждение можно проверить на опыте. Для этого разрежьте шланг сифона и вставьте образовавшиеся концы в подходящий замкнутый сосуд. Подойдёт пластиковый шприц без иглы, но с поршнем. Один конец разрезанного шланга наденьте на отросток, предназначенный для иглы, а второй вставьте в отверстие, проделанное в центре донышка шприца. Закрепите полу-

чившийся сифон с разрезом в штативе и грушей выкачивайте из него воздух, пока шланги не заполнятся водой. Вы увидите, что сифон прекрасно работает, а в шприце бьёт фонтанчик (рис. 6)!



Рис. 6

5. Атмосферное давление или прочность жидкости?

Более полувека назад опыт, подобный только что описанному, выполнил преподаватель Московского государственного университета М.А. Грабовский, вступивший в заочную полемику с самим Р. В. Полем. Полезно познакомиться с тем, как отстаивают свою точку зрения учёные.

«На рис. 7 изображена демонстрационная установка, которая могла бы дать ответ на поставленный вопрос.

Установка состоит из трёх сосудов *A*, *B* и *C*, соединённых между собой резиновыми трубками. Сосуд *A* наполнен водой и соединён через сосуд *C* с сосудом *B*. Сосуд *A* расположен несколько выше сосуда *B*. Таким образом, установка, изображённая на рис. 7, отличается от обычной схемы сифона тем, что в верхней части резиновая трубка разорвана и в её концы вставлены стеклянные трубки, которые, в свою

очередь, введены в небольшой стеклянный цилиндр *C*. Если левая и правая части резиновой трубки заполнены водой, то жидкость будет переливаться из верхнего сосуда в нижний, несмотря на то, что внутри цилиндра *C* столб воды претерпевает разрыв: вода, втекая внутрь сосуда *C*, образует при этом небольшой фонтан. Если силам сцепления принадлежала бы в этом явлении превалирующая роль, то работа сифона по схеме рис. 7 была бы невозможна. В целях проверки утверждения, что основным фактором, определяющим переливание воды из одного сосуда в другой, является атмосферное давление, рекомендуем поставить ещё один контрольный опыт.

Для этого опыта необходимо несколько видоизменить нашу основную установку. Пропустим через верхнюю резиновую пробку, закрывающую сосуд *C*, небольшую стеклянную трубку, которую соединим с водяным манометром (см. рис.7). Пустим теперь сифон в действие и станем измерять давление воздуха в сосуде *C*. Опыт показывает, что внутри сосуда *C* через несколько секунд после начала переливания воды установится постоянное разрежение, равное разности уровней воды в сосудах *A* и *B*. В этом легко убедиться, измеряя линейкой разность уровней воды в сосудах *A* и *B* и сопоставляя эти измерения с показанием водяного манометра. Вследствие разрежения воздуха над водой в цилиндре *C* и действует сифон.

Соединим теперь цилиндр *C* с окружающим воздухом, для чего вынем верхнюю пробку, закрывающую цилиндр. Сифон сейчас же прекратит свою работу.

Этот контрольный опыт ещё раз показывает, что основной причиной, вызывающей действие сифона, является атмосферное давление. Силы сцепления безусловно играют роль в рассматриваемом явлении, но их роль отнюдь не является первостепенной, как то считают некоторые авторы учебников физики» [3, с. 43 – 52].

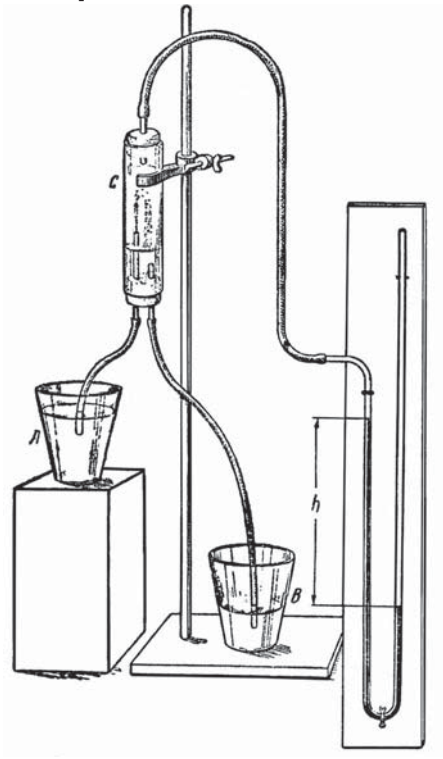


Рис. 7

6. Давление в верхней части сифона

Разумеется, мы воспроизвели установку М.А. Грабовского, воспользовавшись современными материалами: тремя пластиковыми бутылками, силиконовыми медицинскими шлангами для переливания растворов, зажимом и водяным манометром (рис. 8 *а*). Запустив си-

фон, мы обнаружили, что в верхнем сосуде получается весьма приличный фонтанчик (рис. 8 *б*), но манометр показывает совсем не то, о чём говорится в приведённом выше описании! Подумав, мы пришли к выводу, что, возможно, дело вот в чём.



Рис. 8

Представим, что в дне замкнутого сосуда закреплены два шланга, концы которых опущены в стаканы с водой, причём в обоих стаканах поверхности воды находятся на одном уровне. Давление воздуха внутри сосуда равно атмосферному p_a (рис. 9 *а*).

Немного откачаем воздух из сосуда так, чтобы вода поднялась по шлангам на высоту h и образовала на дне сосуда слой небольшой толщины. Давление в сосуде уменьшится на величину ρgh и станет равно $p = p_a - \Delta p$ (рис. 9 *б*), причём $\Delta p = \rho gh$.

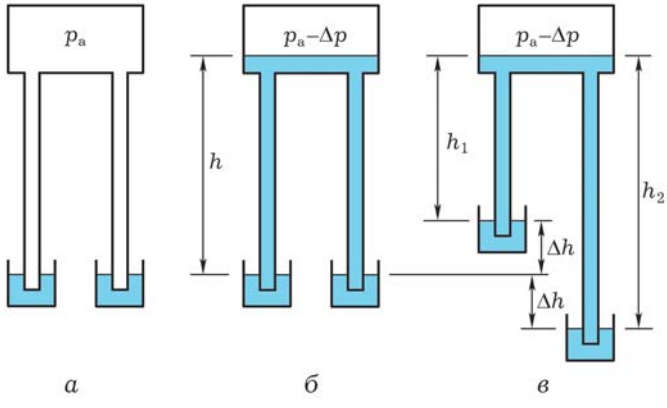


Рис. 9

Опустим правый стакан вместе с нижним концом шланга на величину Δh. Тогда давление возле верхнего конца правого шланга уменьшится на величину $\rho g \Delta h$, возникнет сифонный эффект, вода начнёт перетекать из левого стакана в правый. Чтобы давление в сосуде осталось прежним, его необходимо увеличить на $\rho g \Delta h$, а для этого левый стакан нужно поднять на высоту Δh. В таком случае сифон будет продолжать работать, причем толщина слоя воды в замкнутом сосуде восстановится (рис. 9 *в*).

Так как высота $h_1 = h - \Delta h$ и высота $h_2 = h + \Delta h$, то $h_1 + h_2 = 2h$. Отсюда уменьшение давления в сосуде

$$\Delta p = \rho g h = \rho g \frac{h_1 + h_2}{2}.$$

В самостоятельном эксперименте выясните, какое объяснение соответствует наблюдаемым фактам.

7. Сифон и его автоколебания

Несколько перефразируя известное положение материализма, можно утверждать, что сифон почти так же неисчерпаем как атом. Удостовериться в этом можно, проделав, например, следующий опыт.

На конец стеклянной трубки внешним диаметром около 6 мм и длиной 20 – 30 см натяните резиновый шланг. Возле места соединения шланга с трубкой в резине проделайте отверстие диаметром 1 – 2 мм. Второй конец шланга соедините с водопроводным краном и пустите через стеклянную трубку воду.

Теперь возьмите шланг в руку так, чтобы отверстие оказалось сверху, и разверните шланг таким образом, чтобы стеклянная трубка расположилась почти горизонтально. Подобрав условия опыта, вы увидите, что трубка начинает совершать колебания, происходящие в вертикальном направлении и продолжающиеся всё время, пока из неё вытекает струя!

Чтобы исследовать обнаруженное в опыте явление, необходимо создать определённые условия, обеспечивающие воспроизводимость результатов эксперимента. Для этого трубку нужно не держать в руке, а закрепить, например, в лапке штатива. Конечно, воду удобно подавать из водопроводного крана. Но вместо него вполне можно использовать сосуд с водой (скажем, пластиковую бутылку), поднятый на высоту порядка метра от поверхности стола. Регулировать скорость вытекания воды удобно специальным зажимом или штативной лапкой с резиновыми прокладками.

Стеклянную трубку длиной 300 мм можно взять внутренним диаметром от примерно 4 мм до 10 мм. Мягкий резиновый шланг должен иметь такой же диаметр, что и трубка. В шланге на расстоянии 5 – 10 мм от места соединения со стеклянной трубкой нужно прорезать отверстие диаметром 1 – 3 мм. Оптимальный диаметр этого отверстия без труда подбирается экспериментально.

Лучше, если отверстие сделано сверху шланга, но оно может находиться и сбоку и даже снизу. Длину отрезка шланга от конца стеклянной трубки до лапки штатива следует подобрать опытным путём.

Собрав экспериментальную установку, добейтесь незатухающих автоколебаний стеклянной трубки. Хорошо, если размах колебаний конца трубки достигнет 20 – 25 см. Для получения такого результата вам, возможно, потребуется подобрать место крепления шланга, радиус его изгиба, диаметр отверстия

в стенке шланга и другие условия. Многое зависит от гибкости и жёсткости резинового шланга. Что касается скорости вытекания воды из стеклянной трубки, то она легко регулируется так, что обеспечивается её оптимальное значение.

Для объяснения результата эксперимента внимательно понаблюдайте за потоком воды в трубке. Когда трубка находится в крайнем верхнем положении, она заполняется сплошным потоком воды (рис. 10 *а*). Так как заполненная водой трубка тяжелее, чем пустая, она опускается вниз. Но в крайнем нижнем положении вместо сплошного потока воды трубке перемещается вода с воздушными пузырями (рис. 10 *б*).

Они возникают по той причине, что давление в воде возле отверстия в резиновом шланге меньше атмосферного на величину, равную гидростатическому давлению столба жидкости в стеклянной трубке ρgh, где h – это расстояние, на которое опускается конец трубки, когда она переходит из горизонтального положения в нижнее. Поэтому через отверстие в шланге втягивается воздух, который увлекается потоком воды и идёт по стеклянной трубке в виде пузырьков. Трубка становится легче и поднимается вверх (рис. 10 *в*).

Давление внутри воды возле отверстия в шланге становится равным атмосферному, если трубка находится в горизонтальном положении, и оказывается больше атмосферного, когда трубка по инерции поднимается ещё выше. Теперь через отверстие в шланге воздух уже не затягивается, вода по трубке идёт сплошным потоком, трубка становится тяжелее и опускается вниз. Дальше всё повторяется вновь и вновь.

В сказанном вы легко убедитесь, если рукой принудительно заставите занимать стеклянную трубку верхнее, нижнее и промежуточное положения.

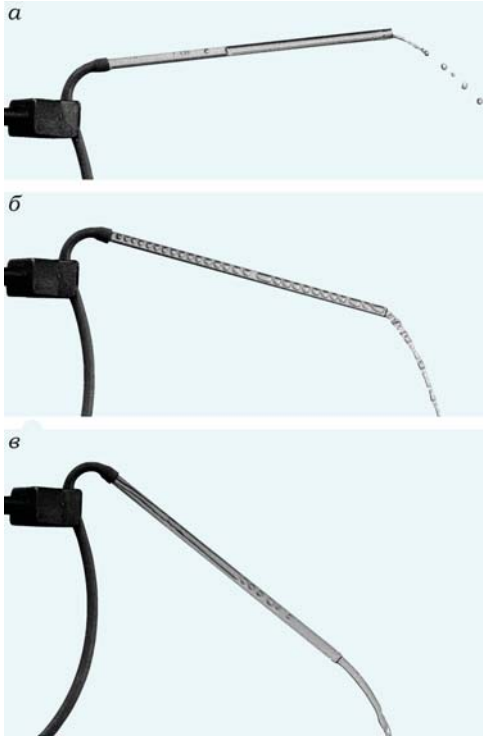


Рис. 10

Литература

1. Элементарный учебник физики. Т. 1. Механика. Теплота. Молекулярная физика / Под ред. Г. С. Ландсберга. – М.: Наука, 1971. – 656 с.

2. *Поль Р.В.* Механика, акустика и учение о теплоте. – М.: Наука, 1971. – 480 с.

3. *Грабовский М. А.* Лекционные демонстрации по физике. Вып. 2. Механика жидкостей и газов. – М.-Л.: Гостехтеориздат, 1948. – 160 с.