

# ЭКСПЕРИМЕНТАТОР ЭДМ МАРИОТТ

Окончание. Начало в «Квантике» № 6

## ПАРАБОЛА ТОРРИЧЕЛЛИ

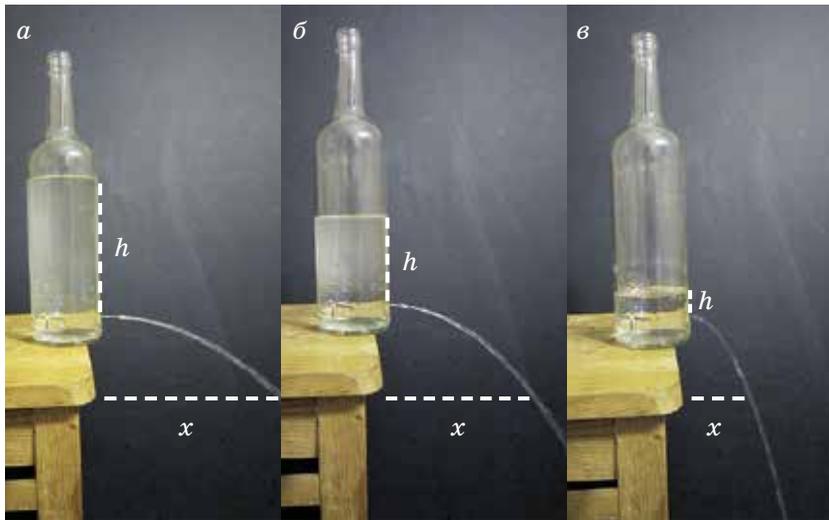
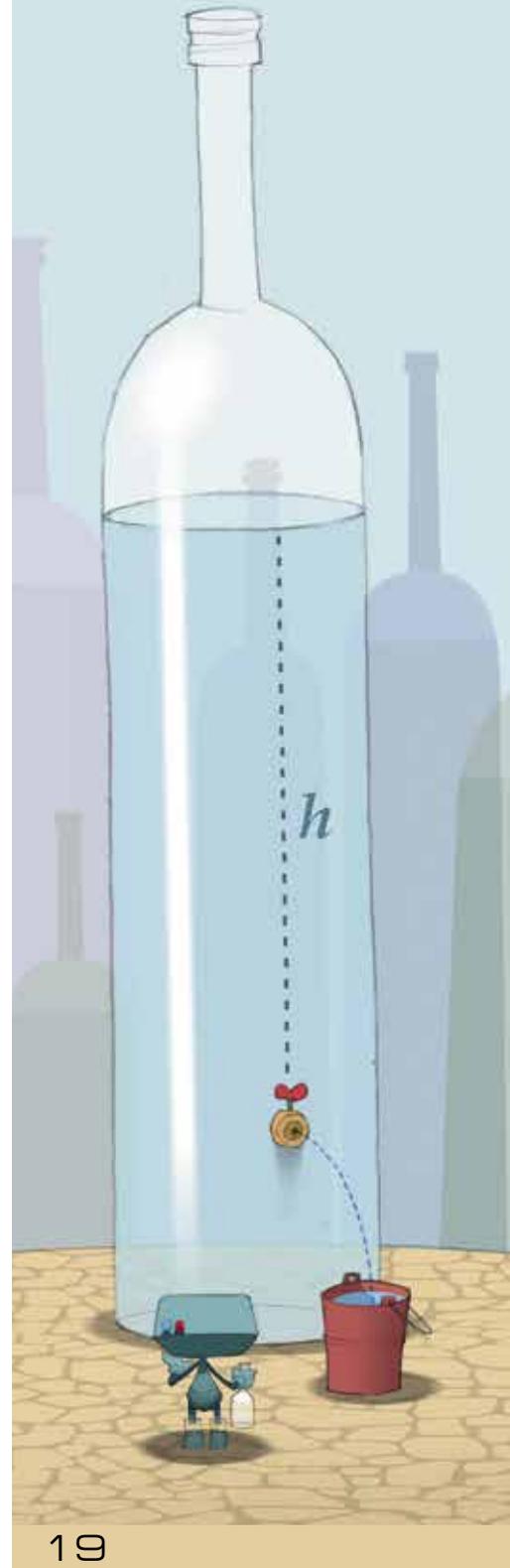


Рис. 5

Наконец, прибор Мариотта готов! На рисунке 5 приведены фотографии воды, вытекающей из бутылки с отверстием. Мои глаза видели вытекающую воду точно так же. Что же они видели?

Во-первых, форма кривой очень похожа на параболу, но это, конечно, важно проверить! Для этого нужно сформировать по возможности большую струю. Отойти от неё подальше, чтобы оптические искажения были меньше, и сделать фотографию, подобрав выгодные освещение и фон. Добавив на фотографию координатную сетку, можно перейти к математической части. Задача совсем не простая. Чтобы немного упростить нахождение оси параболы, имеет смысл фотографировать струю одновременно с отвесом. Отвес – это грузик (например, гайка), висящий на длинной нитке. Направление нитки совпадает с вертикалью.

Итальянский учёный Э. Торричелли (1608–1647) в своих экспериментах обнаружил, что квадрат скорости вытекающей воды пропорционален разнице давлений внутри и снаружи бутылки. Если вы сделаете серию фотографий бутылки по мере вытекания из неё воды, то вы имеете шанс проверить его наблюдение.





Подумайте, как это сделать. Обратите внимание, что струя вытекает из бутылки со скоростью, направленной горизонтально. То есть время, за которое струя опускается на высоту  $h$ , не зависит от уровня воды в бутылке. На рисунке 5 мы показали, какие расстояния следует измерять на сделанных вами фотографиях. Дальность полёта струи, измеренная на одной и той же высоте, зависит от уровня воды в бутылке  $h$ . Какую зависимость обнаружил Торричелли? Получилась ли она в вашем эксперименте? Если получилась, то вы просто молодец! Но особенно не зазнавайтесь.

Вспомните, что Торричелли получил этот результат очень давно! Предложите эксперимент Торричелли без использования фотоаппарата. На рисунке 6 – возможная схема такого эксперимента.

Торричелли обнаружил, что траектория струи воды такая же, как у мячика, падающего от уровня воды до уровня отверстия и изменяющего в этой точке свою вертикальную скорость на горизонтальную. Такое изменение скорости могло бы быть при ударе о правильно поставленную упругую стенку. Если читатель уже немного знаком с наукой о движении тел (кинематикой), то он сумеет сам нарисовать траекторию такого мячика. Для читателя, который еще не знаком с этим разделом физики, мы нарисовали

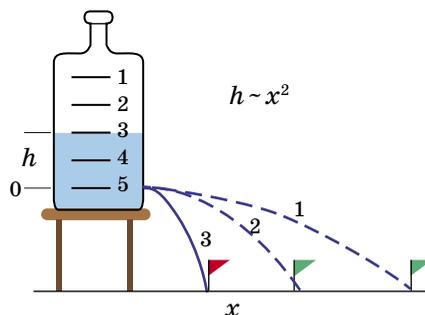


Рис. 6

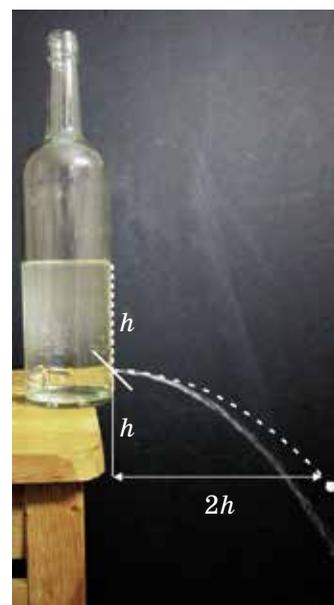


Рис. 7

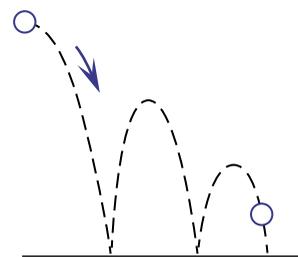


Рис. 8

траекторию такого мячика на рисунке 7 пунктирной линией. При расчёте этой траектории мы предполагали, что удар мячика о стенку абсолютно упругий, то есть скорость мячика до соударения и после него одна и та же. Траектория струи будет описана гораздо лучше, если предположить, что скорость мячика после соударения меньше, чем скорость до соударения. В случае воды, вытекающей из отверстия нашей бутылки, наилучшее совпадение траекторий получается, если предположить, что мячик при соударении теряет приблизительно 15% своей скорости. На рисунке 8 мы изобразили, как будет отскакивать мячик Торричелли в нашем эксперименте от горизонтального пола. Если верить специалистам, то, меняя размеры и качество отверстия, можно добиться того, чтобы траектория струи воды совпадала с траекторией абсолютно упругого мячика с двухпроцентной точностью!

Что ещё необычного можно заметить на фотографиях с рисунков 5 и 7? Видно, что чем дальше струя улетает от бутылки, тем она толще! Это очень необычно. Действительно, через любое сечение струи каждую секунду протекает одинаковый объём воды, равный  $V \cdot S$ , где  $V$  – средняя скорость течения воды через сечение струи, а  $S$  – площадь этого сечения. Вот и получается, что если площадь струи, согласно фотографии, по мере удаления от отверстия увеличивается, то скорость струи в процессе падения должна уменьшаться. Что-то с нашей струей не так!

Чтобы разобраться с этим противоречием, давайте воспользуемся вспышкой нашего фотоаппарата и сделаем «мгновенную» фотографию струи. На рисунке 9 показаны фотографии струй из бутылки с разным ко-



Рис. 9





личеством воды, примерно соответствующие рисункам 5в и 5а. На фотографиях видно, что из бутылки в обоих случаях вытекает сплошная струя. В процессе полёта струя становится тоньше и в некоторый момент начинает разбиваться на капли. Это наблюдение демонстрирует, что поскольку в полёте струя находится в состоянии невесомости, форма воды в струе начинает определяться не силой тяжести и формой отверстия бутылки, а силами поверхностного натяжения. Процесс разбиения на капли имеет взрывной характер, поэтому скорости капель становятся чуть-чуть разными, что приводит к видимому уширению потока. Мой глаз и мозг, к сожалению, не успевают рассмотреть это красивое явление, впрочем, как и фотоаппарат, работающий в режиме без вспышки.

Тем не менее, разрыв струи на капли можно услышать! Давайте будем наливать чай из заварочного чайника в чашку или железную кружку тонкой струйкой и слушать, как шумит струя при падении с разной высоты чайника. Начнём с положения, когда носик чайника находится на уровне кромки чашки, а затем будем плавно поднимать его выше и выше. При некоторой высоте струи чая звук из чашки внезапно станет дробным, как во время дождя!

### СОСУД МАРИОТТА В ДЕЙСТВИИ

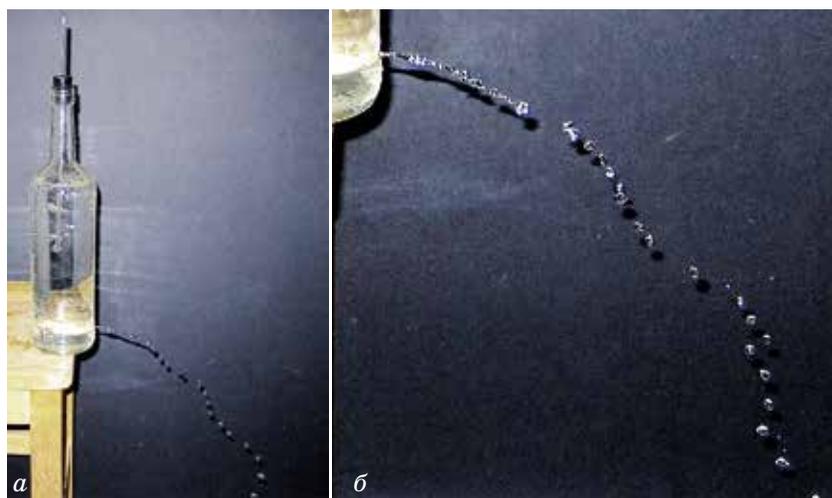


Рис. 10

На рисунке 10 показан сосуд Мариотта в действии (а) и отдельно струя воды в увеличенном масштабе (б).

Чтобы понять принцип работы сосуда Мариотта, заметим, что если по трубочке идёт воздух, то давление внизу трубки близко к атмосферному. Давление в воде на уровне отверстия будет приблизительно равно сумме атмосферного давления и давления столба воды от нижней точки трубочки до отверстия. Перепад давлений снаружи и внутри отверстия будет постоянным до тех пор, пока уровень воды не опустится ниже конца трубочки. Нам удалось объяснить, почему средний расход воды в приборе постоянный.

Вместе с тем на рисунке 10 видно, что траектория струи похожа на параболу только приближённо. Такая форма струи указывает на то, что скорость вытекания воды из отверстия, а значит, и давление в бутылке около отверстия, колеблется относительно среднего значения.

Осталось неясным, с чем связаны эти колебания. Решение этой непростой задачи мы оставим читателю. Мы думаем, что для этого придётся исследовать поведение пузырей воздуха, выходящих из трубки. Желаете вам хороших фотографий, а сосуд Мариотта, который вы сделали (или ещё сделаете), приготовит для вас целый караван послушных воздушных пузырей! Кстати, обратите внимание, что сосуд Мариотта обеспечивает не только постоянный поток воды из бутылки, но и постоянный поток воздуха в бутылку.

### Задачи.

1. Пузырь воздуха вышел из трубки сосуда Мариотта и начал всплывать. Во сколько раз его объём изменился при всплытии на 10 см?

2. Заткните пальцем трубку сосуда Мариотта. Если прибор работает правильно, вода из бутылки не течёт. Почему?

3. Какое максимальное давление воды у отверстия может сдерживать поверхностное натяжение вашего сосуда Мариотта? Попробуйте найти его экспериментально.

4. На наших фотографиях струи, выходящей из бутылки, видна только одна ветвь параболы, поскольку начальная скорость струи была параллельна земле. Наклоняя бутылку, попробуйте пронаблюдать и исследовать другие части параболы.

