

Бабинцев Владимир Александрович
*Ассистент кафедры
 общей физики МФТИ.*



Бабинцева Елена Николаевна
Учитель физики гимназии г. Троицка.

Летние забавы юных физиков

Лето – прекрасная пора. Ярко светит солнышко, тёплый воздух напоён запахами луговых трав. Можно путешествовать, купаться в ласковом море или речке и забыть на время обо всех учебных делах. Но для личностей творческих (каковыми является большинство наших читателей) пассивный отдых обычно не в радость. Такие люди получают удовольствие оттого, что постоянно открывают что-то новое для себя. Эта статья адресована им. В статье предлагается несколько вопросов, связанных с явлениями природы. Об этих вопросах приятно поразмыслить на отдыхе: лёжа на верхней полке скорого поезда, мчащегося к морю, загорая на пляже, любуясь облаками и т. п. Дорогие читатели! Не спешите заглядывать в ответ. Узнать ответ на конкретный вопрос – не самоцель. Дайте своему главному прибору – головному мозгу – спокойно и с удовольствием подумать над, казалось бы, очевидными вещами. Автор статьи гарантирует, что практически во всех задачках решение можно написать на трамвайном билете.

1. Мокрый асфальт. Раскалённая летним солнцем лента загородного шоссе. Воздух дрожит, поднимаясь струями над асфальтом. Но

вот чудо: вдалеке вы замечаете, что свет фар автомобилей отражается от дороги, как от зеркала. Неужели в такую сушь где-то мог сохранить-

ся кусочек мокрого асфальта?! А может это просто мираж?

Чтобы разобраться в этом явлении, полезно вспомнить, что показатель преломления воздуха чуть больше единицы. Чем больше плотность воздуха, тем, естественно, больше его показатель преломления.

Нарисуйте схему, как должен идти луч света, чтобы «зеркально отразиться» от асфальта. Оцените, на сколько процентов отличается показатель преломления воздуха вблизи поверхности асфальта от показателя преломления окружающего воздуха, если человек ростом 175 см имеет возможность наблюдать явление отражения света фар (установлены на высоте 50 см над дорогой) на расстоянии большем 600 м от себя.

Чтобы помочь решить эту проблему, небольшая подсказка. Про-

следим за путешествием луча света в слоистой среде (см. рис. 1). Допустим, имеется стопка стёкол с различными показателями преломления. Луч света попадает в эту стопку и преломляется на границах слоёв по закону Снеллиуса. Заметим, что для каждого слоя выполняется равенство углов падения и преломления: $\alpha_2 = \beta_2$, $\alpha_3 = \beta_3$, $\alpha_4 = \beta_4$, ... т. к. соответствующие углы накрест лежащие. Из этого следует, что

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \beta_2 = n_2 \sin \alpha_2 = \\ = \dots = n_8 \sin \beta_8.$$

Таким образом, угол, под которым выйдет луч из слоистой среды, зависит только от угла, под которым луч упал на слоистую среду, и от начального и конечного показателей преломления! И совсем не зависит от порядка, числа слоёв и их показателей преломления.

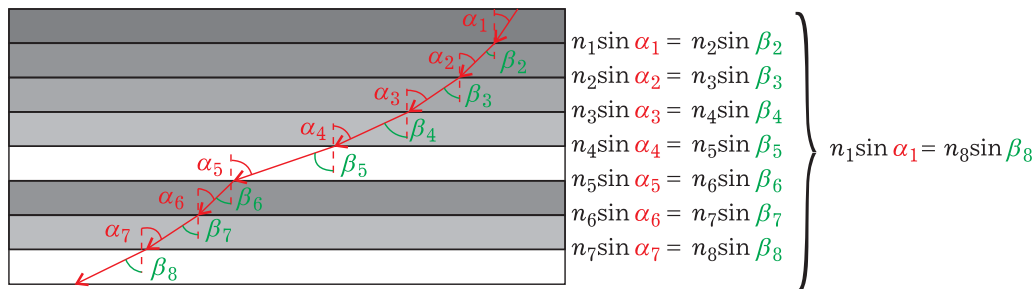


Рис. 1

Решение. Из жизненного опыта известно, что температура воздуха вблизи раскалённого асфальта быстро меняется на расстоянии порядка десятка сантиметров от него, а выше меняется гораздо медленней (кто не наблюдал такой асфальт, тот может вспомнить раскалённую сковороду на кухне). Следовательно, поскольку показатель преломления n пропорционален плотности, а значит, обратно пропорционален температуре, то можно утверждать, что в слое

толщиной порядка десяти сантиметров вблизи асфальта наблюдается резкое уменьшение показателя преломления. Зависимость n от высоты теоретически описать трудно, однако этого и не требуется. Представим воздух вблизи асфальта в виде бесконечно тонких слоёв, характеризующихся определёнными показателями преломления (на самом деле слои постоянно перемещаются, о чём свидетельствует марево; но если под n понимать усреднённое по времени

значение показателя преломления на данной высоте, то модель можно применять). В условии задачи дана подсказка: угол преломления луча, прошедшего через множество плоских слоёв, зависит только от показателей преломления первого и последнего слоёв, а также от угла падения на первый слой. Воспользуемся этим: чтобы луч отразился «от асфальта», необходимо, чтобы для показателя преломления слоя на уровне фар n_0 и для показателя преломления слоя в непосредственной близости от асфальта n выполнялось условие полного внутреннего отражения для угла падения на первый слой:

$$\sin \beta > \frac{n}{n_0}.$$

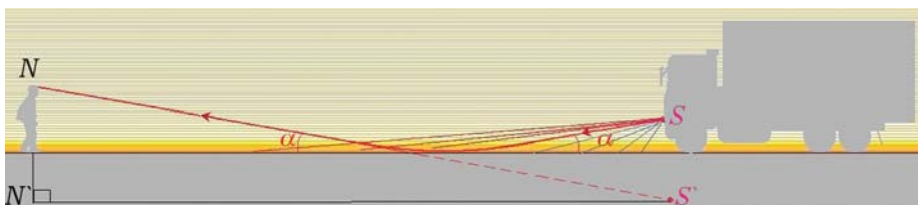


Рис. 2

Если считать, что изгиб луча происходит в тонком приповерхностном слое, то можно рассматривать луч SN как состоящий из двух отрезков (как при отражении от зеркала). Из прямоугольного треугольника $NN'S'$ найдём относительное изменение показателя преломления вблизи асфальта:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n}{n_0} &= \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - \frac{n}{n_0} = 1 - \cos \alpha_{\text{макс}} = \\ &= 1 - \frac{S'N'}{S'N} = 1 - \frac{S'N'}{\sqrt{S'N'^2 + NN'^2}} = 1 - \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{NN'}{S'N'}\right)^2}} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{NN'}{S'N'}\right)^2 \approx 7 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

На рис. 2 лучи света, испущенные фарами автомобиля (точка S), для которых справедливо неравенство, отмечены красным цветом. Эти лучи изогнутся в приповерхностном слое воздуха и сформируют изображение фар в асфальте (точка S'). Лучи, отмеченные синим, диффузно рассеются на поверхности асфальта. Минимальная дальность наблюдения явления отражения определяется попаданием в глаз наблюдателя «отражённого» луча с максимальным значением угла скольжения α . Как видно из рисунка, угол скольжения дополняет угол падения до прямого: $\alpha = 90^\circ - \beta$. Максимальный

$$\text{угол скольжения } \cos \alpha_{\text{макс}} = \frac{n}{n_0}.$$

При расчётах (в последнем преобразовании) была применена полезная формула, верная для $x \ll 1$:

$$(1 + x)^a \approx 1 + ax.$$

Применение этой формулы удобно, но необязательно (можно было посчитать напрямую, без упрощений).

2. Мощность прибой. Если побродить по берегу моря в полосе прибой, то можно заметить, что все камушки под ногами гладкие. Это результат каждодневной работы волн. Изо дня в день волны ударяют о берег и откатываются назад. Работа волн меняет форму берега. А возьмётесь ли вы посчитать, какую работу совершает прибой ежее-

кундно на 1 м береговой линии и сколько работы будет совершено за сутки, за год?

Все исходные данные, необходимые для оценки мощности прилива, у вас перед глазами, если вы на море. Если море далеко, то примите длину волн в открытом море около метра, их высоту около 10 см. Скорость волн в глубоком море зависит от их длины по формуле:

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}.$$

Нужно отметить, что эта формула верна только для небольших по амплитуде волн, и в случае шторма вряд ли нам пригодится.

Решение. В морских волнах частицы воды, двигаясь по замкнутым траекториям, смещаются как по вертикали, так и по горизонтали. При этом идёт непрерывное преобразование потенциальной

энергии поднятой над уровнем моря воды в её кинетическую энергию. Оценим поток энергии, переносимой волнами в направлении берега. Картина из гребней и впадин движется со скоростью u . Очевидно, что энергия переносится с той же скоростью. Примем допущение, что к берегу движется лишь поверхностный слой воды высотой h (что, разумеется, не так, но для грубой оценки подходит, т. к. скорость движения воды быстро убывает с глубиной).

Воспользуемся симметрией волновой картины (см. рис. 3). Мысленно рассечём водную поверхность горизонтальной плоскостью по линии EF . Отделим верхнюю часть и, перевернув, совместим с нижней. Гребни совпадут со впадинами (например, ACB с CDE). Таким образом, для расчёта потока

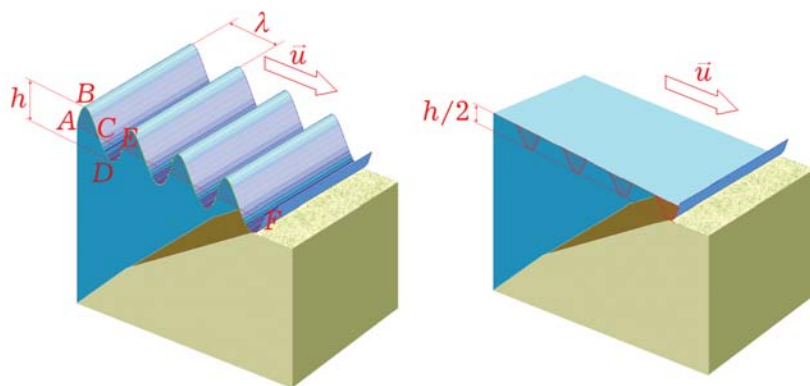


Рис. 3

энергии можно рассматривать движение плоского слоя воды толщиной $h/2$ со скоростью u . Исходя из этой модели, о береговую линию длиной L за одну секунду бьётся масса воды, равная $\rho u \cdot L \cdot h/2$. Эта вода приносит энергию $\rho u^3 \cdot L \cdot h/4$.

Если считать, что вся эта энергия идёт на работу над берегом (пренебрегаем нагреванием воды и излучением звука), то предыдущее выражение и есть искомая мощность прилива. Используя зависимость скорости волн от их длины,

приведённую в условии, получим окончательную оценку:

$$\frac{N}{L} = \frac{\rho h u^3}{4} = \frac{\rho h}{32} \left(\frac{g \lambda}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} \approx 6,5 \text{ Вт.}$$

Нетрудно сосчитать, что за сутки прибор на 1 метре береговой линии совершит работу 0,5 МДж, а за год – работу 0,2 ГДж.

3. Бутылка минералки на столике скорого поезда. Часто летом на столиках пассажирских вагонов красуются фигурные пластиковые бутылки, заполненные различными напитками.

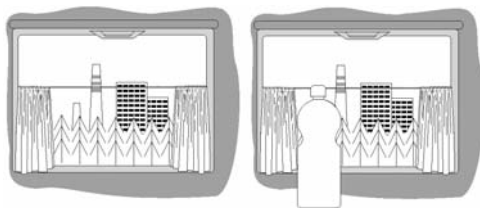


Рис. 4

Если посмотреть через них за окно, то пейзаж волшебным образом преобразуется. Попробуйте схематически отобразить, как изменится законный пейзаж на рис. 4, используя знания по геометрической оптике. В школьном курсе изучаются только тонкие линзы. Разумеется, бутылку нельзя считать тонкой линзой, изображение будет сильно искажённым, однако основные характеристики изображения будут подмечены. Итак, вооружаемся карандашом, рисуем, а потом проверяем на практике!

И ещё одна практическая задача, связанная с бутылкой на столике. Определить ускорение поезда, при котором полностью заполненная бутылка опрокинется. Все данные, касающиеся бутылки, вы можете оценить сами, даже не садясь в поезд. Коэффициент трения скольже-

ния пластика по пластику μ возьмите равным 0,3.

Решение. Условно можно разделить бутылку на три части (рис. 5): верхняя (имеет выпуклое сечение как горизонтальной, так и вертикальной плоскостью), средняя (имеет выпуклое сечение горизонтальной и вогнутое вертикальной плоскостью), нижняя (имеет выпуклое сечение горизонтальной плоскостью). С оптической точки зрения можно рассматривать нижнюю часть бутылки как цилиндрическую собирающую линзу; среднюю часть бутылки как комбинацию собирающей и рассеивающей цилиндрических линз, а верхнюю – как комбинацию двух собирающих линз.

Известно, что если поместить предмет далеко (на расстоянии, много большем, чем фокусное), то, посмотрев через собирающую линзу, мы увидим перевёрнутое уменьшенное изображение, а через рассеивающую – прямое уменьшенное.

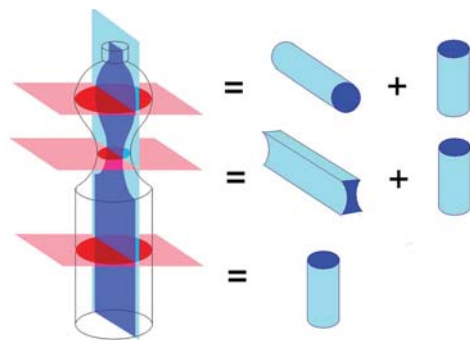


Рис. 5

Цилиндрическая линза уменьшает только в направлении, перпендикулярном оси цилиндра (в направлении, параллельном оси, размеры воспринимаемого нами изображения удалённого предмета не меняются).

Исходя из этих соображений, рисуем предполагаемое изображение (см. рис. 6).

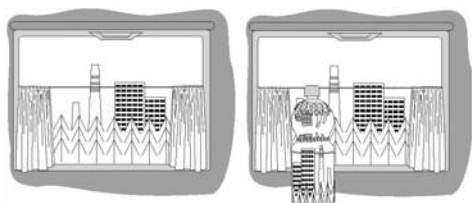


Рис. 6

Можно с уверенностью сказать, что изображение будет перемещаться по ходу поезда, а не против, как реальный пейзаж за окном. Проверим наши догадки, проводя эксперимент (см. рис. 7): поставим на



Рис. 7

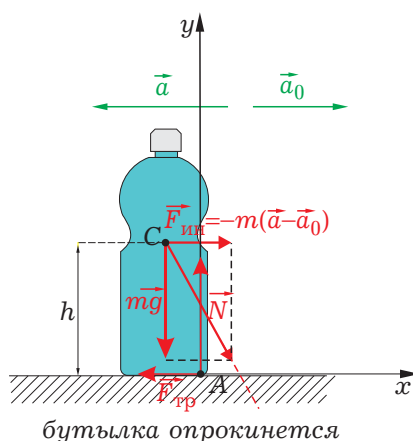
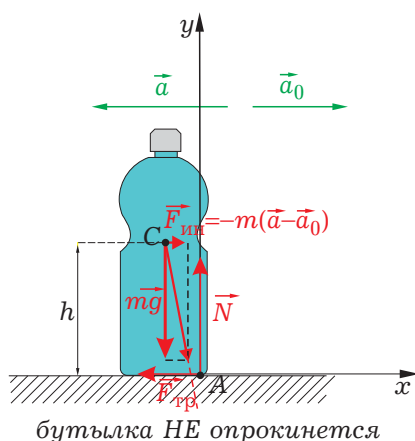


Рис. 8

Будем решать задачу в движущейся системе отсчёта, связанной с самой бутылкой (например, помес-

окошко гимназического кабинета физики (за исключением поезда) фигурную бутылку, заполненную водой. Изображение пейзажа сложно и мозаично. Чтобы разобраться, выделим в пейзаже хорошо узнаваемые точки (А – угол корпуса начальных классов, В – переход в старший корпус, В – высотка) и отметим их изображения на фотографии бутылки. Наименования изображений снабжены индексами в соответствии с правилом: 1 – верхняя часть бутылки, 2 – средняя, 3 – нижняя. Как мы видим, в целом наши предположения о характере изображения оказались верными. Однако, из-за несоответствия реальной бутылки модельной, появились дополнительные зоны (4 и 5). Они дают изображение, аналогичное тому, что даёт верхняя часть бутылки.

Теперь разберёмся с опрокидыванием бутылки. Будем считать, что она заполнена водой полностью (задача для заполненной не до конца бутылки сложнее, но тоже вполне решаема).

тим начало отсчёта в точку А). Эта система неинерциальна, поэтому необходимо ввести дополнитель-

ную силу инерции. При опрокидывании бутылка будет вращаться относительно точки A , а потому условием начала опрокидывания будет выход продолжения равнодействующей сил тяжести и инерции за площадь опоры (см. рис. 8),

или $\frac{F_{\text{ин}}}{mg} > \frac{R}{h}$, где R – радиус основания

бутылки, а h – высота центра масс. Сила инерции рассчитывается по формуле $F_{\text{ин}} = m(a - a_0)$, где a – ускорение поезда, a_0 – ускорение бутылки относительно стола, равное нулю при условии $a < \mu g$ и равное, согласно II закону Ньютона, $a_0 = a - \mu g$ при условии $a > \mu g$. Если подставить a_0 в формулу для силы инерции для этих двух случаев (бутылка скользит и бутылка не скользит), то условие опрокидывания можно написать в виде объединения систем неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} a < \mu g, \\ a > g \frac{R}{h} \end{array} \right\} \cup \left\{ \begin{array}{l} a > \mu g, \\ \mu > \frac{R}{h} \end{array} \right\}.$$

Изобразим решения систем неравенств в виде закрашенных областей на (a, μ) - диаграмме (см. рис. 9).

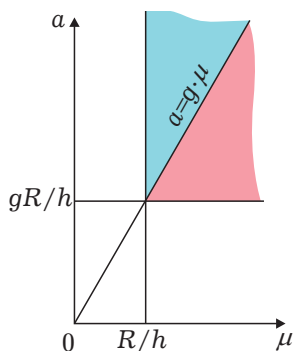


Рис. 9

Легко понять, что при коэффициентах трения, меньших R/h , бутылка не опрокинется ни при ка-

ких ускорениях. При больших значениях μ для опрокидывания необходимо, чтобы ускорение поезда превысило gR/h . Пусть радиус бутылки $R = 3$ см, а высота центра масс равна примерно половине высоты бутылки: $h = 12$ см, тогда минимальное ускорение для опрокидывания примерно равно $2,5 \text{ м/с}^2$ (вполне возможное значение при служебном торможении).

4. Южные звёзды. Красота южного неба воспета многими поэтами. В бархатной черноте сияют мириады алмазов и бриллиантов. Тех, кто впервые оказался в южных (тёплых) широтах, поражает то, что небо кажется намного ближе, звёзды явно крупнее. В чём причина этого оптического обмана? Казалось бы, все звёзды находятся от нас на очень далёком расстоянии, поэтому все они должны изображаться точками в фокальной плоскости линзы или на сетчатке глаза. А как известно, точка не имеет размеров. Почему же одни звёзды кажутся крупнее, а другие мельче (даже в северных широтах)? Этот вопрос адресован выпускникам школы, поскольку ответ на него нельзя дать, не зная основ волновой оптики.

Для младших читателей скажем, что даже из повседневного опыта следует, что более крупными бывают более яркие звёзды. Этой информации должно хватить, чтобы ответить на основной вопрос о кажущейся величине южных звёзд.

Решение. Изображения предметов на сетчатке глаза не могут получиться точечными по ряду причин. Во-первых, из-за того, что приёмниками света в глазу являются рецепторы. Диаметр самых светочувствительных рецепторов – палочек – равен 2 мкм , а плотность их размещения на сетчатке от 20 до 200 тыс. на мм^2 . Размер изображе-

ния не может стать меньше расстояния между палочками. Во-вторых, глазная линза – хрусталик – неидеальна (например, изображения звёзд окружены лучиками из-за неоднородности хрусталика). В-третьих, существует явление дифракции на круглом отверстии зрачка. Дифракция проявляется в отклонении распространения света от прямолинейного. При прохождении через зрачок практически параллельный пучок лучей от звезды становится немного расходящимся, и на сетчатке образуется пятно вместо точки.

Будем определять некоторое место сетчатки углом отклонения от первоначального направления (углом дифракции) φ , который должны приобрести лучи звёздного света, чтобы, преломившись в хрусталике, попасть в данное место (см. рис. 10). Изобразим качественно на рисунке зависимость интенсивности света звезды, попадающего в это место сетчатки, от φ для яркой и тусклой звёзд. Очевидно, это будут кривые с максимумами при $\varphi = 0$ (большая часть света не отклоняется). Угол дифракции

зависит только от длины волны и размера отверстия (зрачка), поэтому размеры пятна на сетчатке от ярких и тусклых звёзд примерно одинаковы (соответственно ширина кривых также одинакова).

Человеческий глаз – очень чувствительный прибор. Адаптировавшись к темноте, он может регистрировать вспышку в 2–3 фотона или порядка 10^{-17} Дж. Отметим на нашей кривой I_{min} – уровень минимальной интенсивности, воспринимаемой глазом. Этот уровень показывает, каким углом дифракции $\Delta\varphi$ соответствует воспринимаемый нами звёздный свет. Из рисунка видно, что диапазон углов для яркой звезды шире, чем для тусклой: $\Delta\varphi_1 > \Delta\varphi_2$ (подробнее про этот график можно прочитать, например, в учебнике Сивухина Д.В. «Общий курс физики», том 4, «Оптика»).

Поэтому изображение яркой звезды будет занимать на сетчатке больше места, чем изображение тусклой, и яркая звезда будет восприниматься нами как более крупная!

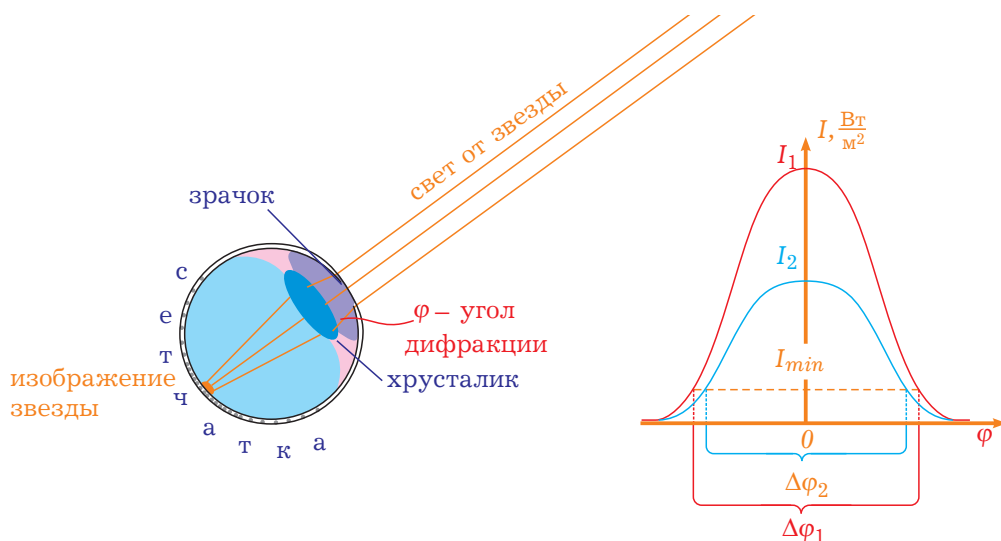


Рис. 10



В тропических широтах (со словом «юг» у нас чаще всего ассоциируются эти места) и в областях с резко континентальным климатом воздух обычно сух. В связи с этим влага конденсируется на значитель-

но больших высотах и в меньших количествах. Облака слабее рассеивают звёздный свет, и звёзды светят ярче. И, как мы только что показали, потому кажутся нам крупнее.

Новости Новости Новости Новости Новости

Пьезоэлектрохимический эффект

Исключительно актуальна ныне задача создания альтернативных существующим источников энергии. В некоторых случаях их можно получить при использовании водорода, которого в природе практически неограниченное (что важно) количество, так как он содержится в молекулах воды, но нужны малозатратные способы его извлечения. Перспективным в этом отношении может оказаться недавно наблюдавшийся в лабораторном эксперименте пьезоэлектрохимический эффект – получение водорода в результате расщепления молекулы воды под действием электрического поля, образующегося при вибрации пьезоэлектрического кристалла.

Обычные пьезоэлектрические материалы «вырабатывают» при деформации электричество с малым коэффициентом полезного действия. Экспериментаторам удалось найти вещество (оксид цинка), «работающее» более эффективно. Они вырастили тонкие гибкие микроволокна из его кристаллов, которые, находясь в воде, интенсивно вибрировали при резонансе с ультразвуковыми волнами, проходящими сквозь воду. Напряжённости электрического поля образовавшегося при этом около кристаллов оксида цинка хватило, чтобы разорвать химические связи водорода и кислорода в молекулах воды и освободить эти газы.

Как считают исследователи, выращивание подобных кристаллических структур с другими параметрами позволит усилить пьезоэлектрохимический эффект, что станет начальной стадией разработки технологии получения водорода таким способом.