

Приложение к журналу

КВАНТ

№3/2000

ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»

Выпуск 1

Бюро



Квантум

ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»

Выпуск 1

Составители В.А.Тихомирова, А.И.Черноуцан



Москва 2000
Бюро «Квантум»

УДК 53(076.5)
ББК 22.3
Л12

Приложение
к журналу «Квант»
№3/2000

Л12 Лаборатория «Кванта». (*Часть I*) / — М.: Бюро Квантум,
2000. — 128 с. (Прил. к журналу «Квант» №3/2000)
ISBN 5-85843-024-4

Книга представляет собой сборник статей из раздела «Лаборатория «Кванта», опубликованных в журнале «Квант» в 80-е годы. Эти статьи помогут читателям не только смастерить или измерить что-то, но и глубже почувствовать суть различных законов и явлений.

Для учащихся и преподавателей средних школ, лицеев и гимназий, для членов и руководителей физических кружков и факультетов, а также для всех тех, кому просто интересна физика.

ББК 22.1я721

ISBN 5-85843-024-4

© Бюро Квантум
«Квант», 2000

СОДЕРЖАНИЕ

Колебания и маятники. <i>А.Боровой, А.Херувимов</i>	5
Маятник Максвелла. <i>А.Боровой, Ю.Климов</i>	13
Новогодний физический фейерверк. <i>А.Шмелев</i>	18
Сто лет назад. <i>А.Варламов</i>	22
Что происходит на границе. <i>А.Боровой, Ю.Климов</i>	28
Что такое стробоскоп. <i>С.Гаврилов</i>	34
Первоапрельский калейдоскоп. <i>А.Боровой</i>	39
Где тонко, там и рвется. <i>В.Майский</i>	45
Удивительная жидкость. <i>И.Медков</i>	49
Цвета рассеянного света. <i>А.Боровой</i>	53
Связанные маятники. <i>Е.Бутиков</i>	57
Фонтаны в парках и дома. <i>С.Гаврилов</i>	62
Почему «поет» водопровод? <i>Е.Пальчиков</i>	67
Пузырьки в жидкости. <i>А.Боровой</i>	71
Мостик из бумаги. <i>А.Боровой</i>	77
Опыты со светящимися веществами. <i>Е.Коломейцев</i>	82
Осмоз. <i>А.Боровой</i>	87
Кардиограмма ртутного сердца. <i>Я.Гегузин</i>	94
Капилляры и смачивание. <i>А.Боровой</i>	99
Наблюдения над туманом. <i>А.Боровой</i>	103
Может ли белое быть чернее черного? <i>В.Майер</i>	107
Жидкий азот и медная гайка. <i>В.Утешев</i>	109
Необычный маятник. <i>А.Агафонов, С.Селицер</i>	113
Как заметить незаметное. <i>В.Утешев</i>	115
Зеленый туман. <i>В.Майер</i>	120
Как увидеть ... несуществующее. <i>В.Креймер</i>	126

ПРЕДИСЛОВИЕ

Готовя каждый номер журнала «Квант» или Приложения к нему, редколлегия «Кванта» всегда старается подбирать материалы так, чтобы читатели разного уровня подготовки и с разными интересами могли найти для себя что-нибудь полезное. Поэтому наряду с теоретическими материалами и задачами различной степени сложности в «Кванте» регулярно публикуются статьи и заметки для тех, кому интересно знать, «как это устроено» или «как это сделать своими руками». Именно для таких читателей и была создана рубрика «Лаборатория «Квант».

Изучая материалы этой рубрики, читатель получает возможность не только что-то смастерить, собрать или измерить, но и глубже почувствовать физическую суть различных законов и явлений. Ведь нельзя забывать, что физика – наука экспериментальная, и именно эксперимент может и должен проверить выводы, полученные из теоретических расчетов и рассуждений.

В этой книге собраны статьи, опубликованные в журнале «Квант» в рубрике «Лаборатория «Кванта» в 80-е годы.

КОЛЕБАНИЯ И МАЯТНИКИ

А.Боровой, А.Херувимов

Эксперименты и наблюдения

Сейчас уже невозможно проверить легенду о том, как Галилей, стоя на молитве в соборе, внимательно наблюдал за качанием бронзовых люстр. Наблюдал и определял время, затраченное люстрой на движение туда и обратно. Это время потом называли периодом колебаний. Часов у Галилея не было, и, чтобы сравнить периоды колебаний люстр, подвешенных на цепях разной длины, он использовал частоту биения своего пульса.

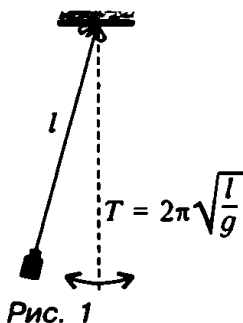
Давайте и мы начнем с аналогичных простых опытов.

1. Возьмите небольшой по размерам грузик (лучше всего – гирьку для весов) и привяжите к нему прочную нить или леску (рис.1). Вы получите простейший так называемый математический маятник. Подвесьте маятник, например к гвоздю, и начинайте опыты.

Меняя массу грузика и длину лески, вы можете убедиться в том, что период колебаний такого маятника не зависит от массы грузика, но зависит от длины лески: с увеличением длины l лески период колебаний T увеличивается. Такие выводы сделал и Галилей.

Точная формула для периода колебаний маятника $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, где g – ускорение свободного падения, появилась значительно позже. Ее вывел Гюйгенс. Проверьте эту формулу для вашего маятника.

Понаблюдайте за маятником некоторое время, и вы заметите, что размах (амплитуда) его колебаний постепенно уменьшается – колебания затухают. Причем затухание происходит тем быстрее, чем меньше масса грузика. Обратите на это внимание. Несколько позже нам это понадобится.



2. Вбейте два гвоздя на расстоянии приблизительно 30 см друг от друга по горизонтали и прикрепите к ним маятники. Массу одного грузика возьмите равной $m_1 = 100$ г, а массу второго – $m_2 = 500$ г. Длину нити первого маятника выберите равной $l_1 = 1$ м, а длину нити второго маятника нужно будет изменять, например так: $l_2 = 0,5; 0,7; 1; 1,2; 1,5$ м.

Возьмите медную проволоку диаметром около 0,3 мм и сделайте из нее мягкую пружинку длиной 30 см (например, навейте проволоку на обычный круглый карандаш и затем аккуратно снимите).

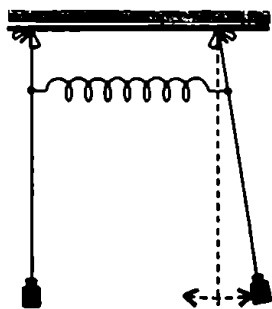


Рис. 2

Теперь соберите всю «установку», как показано на рисунке 2. Это – так называемые связанные маятники. С ними можно проделать много интересных опытов.

Слегка раскачайте тяжелый (второй) маятник и предоставьте систему самой себе. Повторите опыт несколько раз, меняя длину нити тяжелого маятника. Как ведет себя при этом легкий (первый маятник)? Когда разность длин нитей обоих маятников велика, колебания второго практически не влияют на первый. Когда же длины нитей сравнимы между собой, первый маятник начинает раскачиваться; причем раскачивается он то сильно, то слабо, потом снова сильно и снова слабо и так далее. Почему?

Очевидно, для передачи энергии от второго маятника к первому необходимо, чтобы толчки от пружинки происходили в такт с качаниями первого маятника. Это осуществляется при равенстве длин нитей маятников. В таком случае говорят, что наступил резонанс. Обратите внимание на то, что амплитуда колебаний тяжелого маятника почти не меняется. Значит, он передает легкому маятнику лишь небольшую часть своей энергии.

Поменяйте маятники местами, т.е. первоначально раскачайте легкий маятник. Вы убедитесь, что резонанс будет выражен гораздо слабее (чем легче маятник, тем быстрее затухают его колебания). Проверьте это еще раз, воспользовавшись маятником с грузиком массой 20 г.

Наконец, подвесьте на одинаковых нитях одинаковые по массе грузики и раскачайте один из них. Вы увидите, что в этом случае оба маятника будут попеременно раскачиваться то сильно, то слабо, пока совсем не остановятся. Причем, если один сейчас колеблется с большой амплитудой, то второй – с малой, и наоборот. Колебания как бы перетекают от первого грузика ко второму и обратно.

Оказывается, все дело в наложении колебаний. Маятники соединены слабой пружинкой, колебания которой передают энергию от одного маятника к другому и как бы регулируют эту передачу. Наложение таких двух колебаний называют биениями.

Интересно, что математические уравнения, которые описывают биения (и с которыми вы познакомитесь во второй части статьи), недавногодились в... нейтринной физике. Б.М.Понтекорво предположил, что один сорт нейтрино (аналог первого маятника) может переходить в другой сорт (второй маятник), если в природе есть слабое взаимодействие (пружинка), связывающее эти сорта. И вот, может оказаться, что нейтрино, летящие на Землю от Солнца, по дороге все время меняют свою природу. Происходит то же, что и с маятниками. Сейчас ученые во всем мире ставят эксперименты, чтобы выяснить, существуют ли так называемые осцилляции Понтекорво – процесс перехода одного сорта нейтрино в другой.

3. Этот опыт потребует некоторого терпения.

Изготовьте пять – шесть одинаковых маятников и свяжите их одинаковыми пружинками (рис.3). Приведите в движение первый маятник, и вы увидите, как постепенно колебания будут

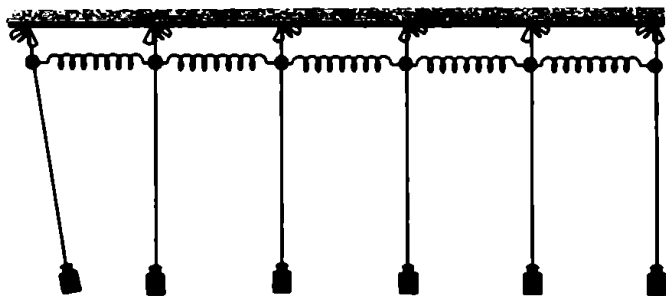


Рис. 3

передаваться остальным маятникам – по цепочке маятников побежит волна.

Такая система – простейшая модель одномерной кристаллической решетки. На ней можно, например, наглядно проиллюстрировать поведение кристаллической решетки, когда в каком-то месте решетки возникают колебания.

Расчеты и объяснения

Попробуем описать поведение связанных маятников с помощью математики.

Напомним, что уравнение движения математического маятника получается из второго закона Ньютона

$$ma_{\tau} = -mg \sin \varphi,$$

где m – масса маятника, a_τ – проекция ускорения на направление касательной к траектории маятника, $mg \sin \varphi$ – проекция силы тяжести на то же направление, φ – угол отклонения нити от вертикали. При малых углах $\sin \varphi \approx \varphi = \frac{s}{l}$ (s – смещение маятника, измеряемое длиной дуги, l – длина нити), поэтому уравнение движения принимает вид

$$ma_\tau l = -mgs. \quad (1)$$

Из курса математики известно, что ускорение – это вторая производная смещения от времени: $a_\tau = s''$, так что уравнение (1), введя обозначение $g/l = \omega^2$, можно записать в виде

$$s'' + \omega^2 s = 0. \quad (2)$$

Решением уравнения (2) является функция

$$s = s_m \cos \omega t.$$

Здесь $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$ – круговая частота колебаний маятника. (Теперь понятно, откуда получается формула для периода колебаний математического маятника: $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.)

Для того чтобы учесть влияние пружинки, соединяющей два маятника, удобно уравнение (1) переписать так:

$$mls'' = -mg\varphi l. \quad (3)$$

В правой части этого уравнения записан момент тангенциальной составляющей силы тяжести относительно оси вращения, проходящей через точку подвеса маятника. В таком виде уравнение носит более общий характер, так как позволяет учитывать силы, действующие не только на грузик, но и на нить.

Рассмотрим связанные маятники одинаковой массы m , скрепленные пружинкой жесткостью k (рис.4). Пусть в некоторый момент времени нити маятников составляют с вертикалью малые углы φ_1 и φ_2 , а смещения маятников от положения равновесия равны s_1 и s_2 соответственно. Растяжение пружинки в этот момент равно

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \epsilon l \sin \varphi_2 - \epsilon l \sin \varphi_1 = \epsilon l (\varphi_2 - \varphi_1) = \epsilon (s_2 - s_1).$$

Со стороны пружинки на нити маятников действуют силы упругости \vec{F}_1 и \vec{F}_2 такие, что

$$F_1 = F_2 = k\Delta x = k\epsilon (s_2 - s_1).$$

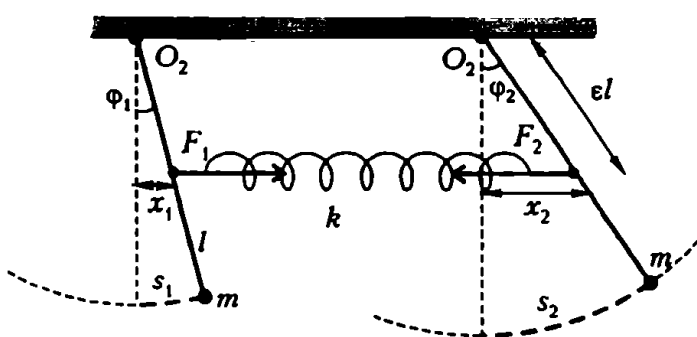


Рис. 4

Относительно осей, проходящих через точки подвеса O_1 и O_2 , эти силы создают вращательные моменты, противоположные по знаку, но одинаковые по абсолютной величине:

$$M = k\epsilon(s_2 - s_1) \cdot \epsilon l = k\epsilon^2 l(s_2 - s_1).$$

Добавим эти моменты (с учетом соответствующих знаков) в правую часть уравнения (3), записанного для каждого маятника. После сокращения на ml получим систему

$$\begin{cases} s_1'' = -\frac{g}{l}s_1 + \frac{k\epsilon^2}{m}(s_2 - s_1), \\ s_2'' = -\frac{g}{l}s_2 - \frac{k\epsilon^2}{m}(s_2 - s_1). \end{cases} \quad (4)$$

Теперь заменим эту систему другой, в которой первое уравнение будет суммой, а второе разностью уравнений системы (4). Кроме того, учтем, что $s_1'' \pm s_2'' = (s_1 \pm s_2)''$, а потому введем обозначения: $s_1 + s_2 = s_+$ и $s_1 - s_2 = s_-$. В результате получим

$$\begin{cases} s_+'' + \frac{g}{l}s_+ = 0, \\ s_-'' + \left(\frac{g}{l} + \frac{2k\epsilon^2}{m}\right)s_- = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Каждое из уравнений данной системы имеет вид уравнения (2), решение которого известно:

$$s_+ = s_{+m} \cos \omega_+ t, \quad s_- = s_{-m} \cos \omega_- t.$$

Здесь $\omega_+ = \sqrt{\frac{g}{l}}$ — круговая частота колебаний одного маятника,

а $\omega_- = \sqrt{\frac{g}{l} + \frac{2k\epsilon^2}{m}}$ – частота, несколько большая частоты одиночного маятника.

Снова вернемся к переменным s_1 и s_2 , для чего почленно сложим и вычтем предыдущие равенства. В результате получим уравнения колебаний каждого из маятников:

$$s_1 = \frac{1}{2}(s_{1m} + s_{2m})\cos\omega_+t + \frac{1}{2}(s_{1m} - s_{2m})\cos\omega_-t,$$

$$s_2 = \frac{1}{2}(s_{1m} + s_{2m})\cos\omega_+t - \frac{1}{2}(s_{1m} - s_{2m})\cos\omega_-t.$$

Проанализируем эти уравнения. Если начальные смещения обоих маятников одинаковы: $s_{1m} = s_{2m} = s_m$, то маятники будут колебаться с постоянной амплитудой и частотой $\omega_+ = \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$:

$$s_1 = s_2 = s_m \cos\omega t.$$

Если вначале маятники отклонены в противоположные стороны так, что $s_{1m} = -s_{2m} = s_m$, то маятники будут колебаться тоже с неизменной амплитудой, но с чуть большей частотой

$$\omega_- = \sqrt{\frac{g}{l} + \frac{2k\epsilon^2}{m}}:$$

$$s_1 = s_m \cos\omega_-t, \quad s_2 = -s_m \cos\omega_-t.$$

Если же в начальный момент сместить из положения равновесия только один маятник, например первый: $s_{1m} = s_m$ и $s_{2m} = 0$, то получим

$$s_1 = \frac{1}{2}s_m(\cos\omega_+t + \cos\omega_-t),$$

$$s_2 = \frac{1}{2}s_m(\cos\omega_-t - \cos\omega_+t).$$

Используя тригонометрические тождества

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\beta-\alpha}{2},$$

$$\cos\alpha - \cos\beta = 2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\beta-\alpha}{2},$$

получим окончательные уравнения колебаний маятников:

$$s_1 = s_m \cos \frac{\omega_- - \omega_+}{2} t \cos \frac{\omega_+ + \omega_-}{2} t,$$

$$s_2 = s_m \sin \frac{\omega_- - \omega_+}{2} t \sin \frac{\omega_+ + \omega_-}{2} t.$$

Соответствующие графики приведены на рисунке 5.

Заметим, что разность частот $\omega_- - \omega_+$ существенно меньше их суммы $\omega_+ + \omega_-$, поэтому функции $\cos \frac{\omega_- - \omega_+}{2} t$ и $\sin \frac{\omega_- - \omega_+}{2} t$ меняются со временем гораздо медленнее, чем функции $\cos \frac{\omega_+ + \omega_-}{2} t$ и $\sin \frac{\omega_+ + \omega_-}{2} t$. Вследствие этого можно считать, что колебания связанных маятников происходят по гармоническому закону, но амплитуды колебаний не постоянны, а медленно изменяются с течением времени по законам $s_m \cos \frac{\omega_- - \omega_+}{2} t$ и $s_m \sin \frac{\omega_- - \omega_+}{2} t$. (На рисунке 5 пунктиром показаны графики изменения амплитуд со временем.)

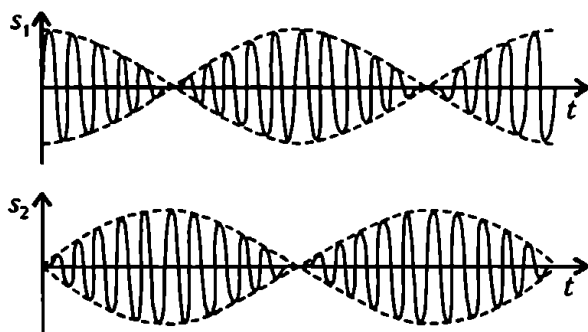


Рис. 5

Это – те самые биения, которые вы наблюдали во втором опыте с одинаковыми маятниками. В начальный момент $t = 0$ амплитуда второго маятника равна нулю, затем она растет, достигая наибольшего значения s_m в момент времени, определяемый соотношением $\frac{\omega_- - \omega_+}{2} t = \frac{\pi}{2}$. В этот же момент амплитуда первого маятника, которая в начальный момент была максимальной, становится равной нулю. Это означает, что произошла полная передача энергии от первого маятника ко второму. Затем процесс пойдет в обратном направлении.

Гораздо труднее математически описать колебания связанных маятников с разными массами, но одинаковыми длинами нитей (при желании попробуйте сделать это самостоятельно). Заметим только, что в этом случае амплитуда первоначально отклоненного маятника в ноль не обращается – энергия хотя и передается другому маятнику, но не полностью. Это вы тоже наблюдали на опыте.

Если же длины маятников не одинаковы ($l_1 \neq l_2$), то, как вы видели на опыте, резонанса не будет. В математическом описании это скажется в том, что станет невозможным переход от системы (4) к системе (5).

В заключение советуем вам самостоятельно исследовать вопрос о зависимости колебаний связанных маятников от жесткости пружинки, от положения места ее крепления к нитям и от масс маятников. Попробуйте, например, решить задачу для случая, когда масса одного маятника гораздо больше массы другого, и сравните полученный результат с опытом (для этого один из маятников прикрепите пружинкой к стене).

МАЯТНИК МАКСВЕЛЛА

А.Боровой, Ю.Климов

«Важным разделом наших обязанностей является постановка иллюстративных опытов, поощрение других к постановке их и развитие всевозможными способами освещаемых ими идей. Чем проще материалы иллюстративного опыта и чем более они привычны учащемуся, тем глубже он поймет идею, которую должен иллюстрировать этот опыт. Воспитательная ценность таких опытов часто обратно пропорциональна сложности приборов», — эти слова великого английского физика Джеймса Клерка Максвелла как бы специально предназначены для Лаборатории «Кванта». В данной статье мы хотим обратиться к прибору, носящему его имя, — к так называемому маятнику Максвелла. Несложный в изготовлении, он часто демонстрируется на лекциях по механике и позволяет выявить ряд интересных закономерностей движения твердого тела.

Посмотрите на фотографию такого маятника (рис.1). Это диск, насаженный на ось, к которой привязаны две нити (их верхние концы закреплены). Закрутите нити вокруг оси — диск поднимется. Теперь отпустите маятник — и он будет совершать периодическое движение: сначала диск опускается, нити раскручиваются, диск вращается все быстрее и быстрее; дойдя до нижней точки и продолжая по инерции вращаться, диск меняет направление своего движения и поднимается вверх, нити накручиваются на ось, движение диска замедляется; в самой



Рис. 1

Опубликовано в «Кванте»
№11 за 1981 год.

верхней точке маятник на мгновение останавливается и снова начинает свое движение вниз ...

Сразу хотим предупредить читателей, что маятник будет колебаться устойчиво и достаточно долго, если соблюсти несколько условий. Сам диск должен быть относительно тяжелым ($m > 100$ г) и большим (диаметром 5 – 8 см), ось – тонкой (диаметром 4–5 мм) и «невесомой», а нити – прочными и достаточно длинными ($\sim 0,5$ м). Обратите внимание на то, чтобы диск находился строго посередине оси и был перпендикулярен к ней, а нити имели одинаковые длины.

Для изучения закономерностей движения маятника нам понадобятся часы с секундной стрелкой (конечно, лучше секундомер) и набор дисков – одного и того же радиуса, но разной толщины (массы), а также различных радиусов, но одной толщины. Диски удобно сделать съемными; один из способов их закрепления на оси показан на фотографии на рисунке 2.

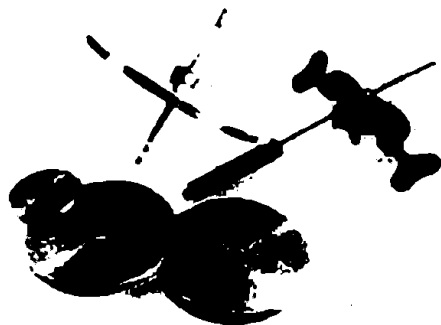


Рис. 2

Итак, начнем наши эксперименты. Наблюдения за колебаниями различных маятников дают первый результат – период колебаний, т.е.

полное время спуска и подъема маятника, не зависит от массы диска, а зависит от его радиуса, причем зависимость эта почти прямая пропорциональная. Далее, легко видеть, что с течением времени колебания довольно заметно затухают, причем чем меньше становится их амплитуда (максимальная высота подъема) и чем меньше скорость вращения диска, тем менее устойчиво ведет себя маятник. Интересно также проделать такой эксперимент: задавая некоторые возмущения (т.е. выводя маятник из устойчивого состояния), проследить за их затуханием при движении маятника. Если, например, в момент запуска слегка повернуть диск в горизонтальной плоскости, то при своем падении он довольно быстро вернется к относительно устойчивому положению. Но если же отклонить маятник в плоскости его вращения, то практически до самого конца движения сохраняются оба колебания: вверх-вниз и в плоскости вращения.

Постараемся теперь объяснить часть наших экспериментальных результатов. Для простоты рассуждений предположим, что вся масса рассматриваемого диска сосредоточена на его поверх-

ности, т.е. что маятник не диск, а обруч. Обозначим радиус обруча через R , а радиус оси – через r (рис.3). Рассмотрим маятник в тот момент, когда он опустился на расстояние h от верхнего положения. Каждая точка обруча, например точка A , одновременно участвует в двух движениях: в поступательном движении вместе с осью O вниз со скоростью $v_O = v_{\text{пост}}$ и вращательном со скоростью $v_{\text{вр}}$:

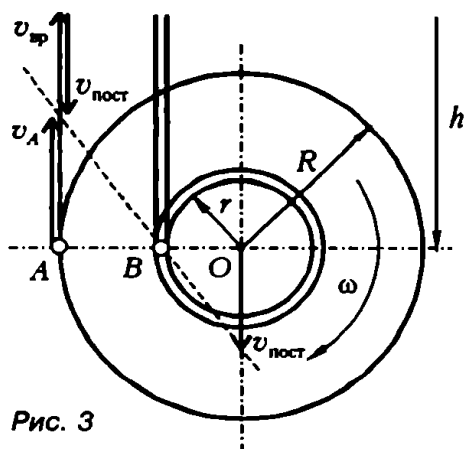


Рис. 3

$$v_A = v_{\text{вр}} - v_{\text{пост}}.$$

Нить разматывается без проскальзывания, и это означает, что мгновенная скорость точки B равна нулю. Поэтому движение маятника можно представить и как ряд последовательных поворотов вокруг мгновенного центра вращения B . Тогда справедливо равенство

$$\frac{v_O}{v_A} = \frac{r}{R-r}, \text{ или } \frac{v_{\text{пост}}}{v_{\text{вр}} - v_{\text{пост}}} = \frac{r}{R-r}. \quad (1)$$

Отсюда получаем

$$\frac{v_{\text{пост}}}{v_{\text{вр}}} = \frac{r}{R}.$$

Теперь воспользуемся законом сохранения энергии:

$$mgh = \frac{mv_{\text{пост}}^2}{2} + \frac{mv_{\text{вр}}^2}{2}. \quad (2)$$

Мы представили кинетическую энергию (правую часть равенства (2)) в виде двух слагаемых – энергии поступательного движения и энергии вращательного движения вокруг центра тяжести.¹

Из кинематики известно, что

$$v_{\text{пост}}^2 = 2ah, \quad (3)$$

где a – модуль ускорения поступательного движения маятника.

¹ Возможность такого разбиения можно доказать строго, но интуитивно это ясно и так.

Таким образом, из уравнений (1)–(3) найдем

$$a = \frac{g}{1 + (R/r)^2}.$$

В нашем случае $R/r \gg 1$ (при этом условии выполняется требование «невесомости» оси), поэтому можно считать, что

$$a = g \left(\frac{r}{R} \right)^2. \quad (4)$$

Если длина разматывающейся нити l , то $l = at^2/2$ и период колебаний маятника равен

$$T = 2t = 2\sqrt{\frac{2l}{a}} = 2\frac{R}{r}\sqrt{\frac{2l}{g}}. \quad (5)$$

Для диска формулы (4) и (5) соответственно преобразуются (см. «Дополнение»):

$$a = 2g \left(\frac{r}{R} \right)^2, \quad (4') \quad T = 2\frac{R}{r}\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (5')$$

Теперь мы можем сравнить результаты расчетов и экспериментов. Из (4') и (5') видно, что и ускорение a , и период T не зависят от массы диска, но зависят от отношения радиусов R/r : чем больше R (по сравнению с r), тем меньше ускорение и, соответственно, больше период колебаний. Это действительно согласуется с экспериментом. Но если вы опыты проводили

аккуратно, то заметили, что расчетный период (5') меньше экспериментального. Это, как уже говорилось, связано с затуханием. А как вы думаете – где именно происходит наибольшая потеря энергии?

Наконец, можно проделать еще один очень эффектный опыт с маятником Максвелла, но для этого необходимы весы (рис.4). Сначала при неподвижном маятнике приведите

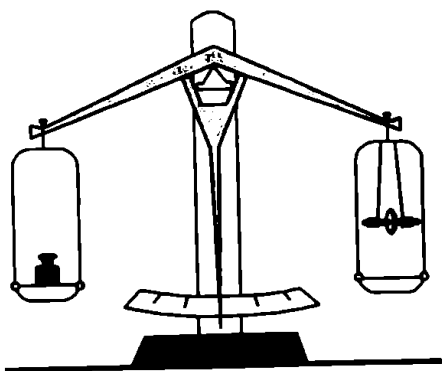


Рис. 4

весы в равновесие, а затем отпустите маятник. Равновесие нарушится: маятник как бы станет легче. Почему? Объясните это самостоятельно.

Дополнение

Для тех, кто знаком с интегральным исчислением, приведем вывод формулы кинетической энергии вращающегося диска.

Разобьем диск радиусом R на n тонких колец шириной Δx каждое (рис.5). Кинетическая энергия одного кольца радиусом x и шириной Δx равна

$$\Delta E_k = (\rho \cdot 2\pi x b \Delta x) \frac{\omega^2 x^2}{2},$$

где ρ – плотность материала диска, b – его толщина, ω – угловая скорость вращения, а выражение в скобках – масса выбранного кольца.

Кинетическая энергия всего диска приближенно равна сумме кинетических энергий отдельных колец:

$$E_k \approx \sum \Delta E_k.$$

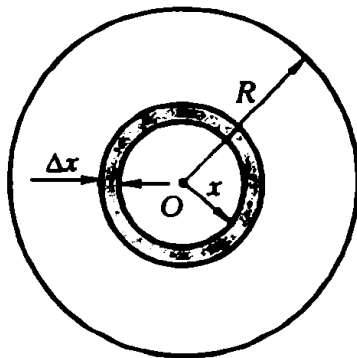


Рис. 5

Если перейти к пределу при n , стремящемся к бесконечности, приближенное равенство становится точным:

$$\begin{aligned} E_k &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum \Delta E_k = \int_0^R \rho \cdot 2\pi x b \frac{\omega^2 x^2}{2} dx = \frac{\rho \pi b \omega^2 R^4}{4} = \\ &= \frac{(\rho \pi R^2 b) \omega^2 R^2}{4} = \frac{m \omega^2 R^2}{4}. \end{aligned}$$

Кинетическая энергия вращающегося обруча той же массы равна $mv^2/2 = m\omega^2 R^2/2$. Следовательно, кинетическая энергия диска в два раза меньше.

Формулы (4') и (5') выведите самостоятельно.

НОВОГОДНИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ФЕЙЕРВЕРК

А.Шмелев

Когда мы идем по снегу

Многие, наверное, видели фильм «Александр Невский». Но, возможно, не все знают, что основной эпизод картины – Ледовое побоище – снимался... летом. Жара достигала тридцати граду-



сов, а надо было показать снег и лед на Чудском озере. Однако выход был найден: большую площадку около Мосфильма засыпали смесью нафталина и соли. Когда актеры шли по такому «снегу», он скрипел, как настоящий в сильный мороз.

Можно легко повторить этот опыт, насыпав ровным слоем на тарелку сахарный песок или соль. Нажмите ложкой на такой слой, и вы услышите слабый скрип. Попробуйте смочить сахар или соль или слегка расплавить сахарный песок (например, на сковородке) – скрип прекратится.

Теперь предоставим слово Уокеру (см. книгу Дж.Уокера «Физический фейерверк» – *прим. ред.*): «Иногда снег скрипит под ногами, но это бывает лишь в те дни, когда температура воздуха существенно ниже нуля. Что создает этот звук, и почему его возникновение зависит от температуры?».

Тайна мороженого

Когда впервые появилось мороженое, способ его приготовления охранялся как строжайший секрет. Напрасно при многих

Опубликовано в «Кванте» №1 за 1982 год.

европейских дворах пытались использовать снег или лед для замораживания смеси из сливок, сахара и фруктовых соков. Смесь охлаждалась, но не замерзала. Пришлось прибегнуть к средству, которое мы теперь называем промышленным шпионажем. Что же выяснилось?



«Когда моя бабушка делает дома мороженое, — пишет Уокер, — она обкладывает сосуд для мороженого льдом, а лед посыпает солью. Зачем она сыпет соль?»

Итак, все дело в обычной соли. Прodelайте ряд простых опытов, прежде чем ответить Уокеру. Возьмите снег или истолченный лед и постепенно добавляйте к ним соль, перемешивая смесь. (Приятно, но не обязательно, чтобы опыт сопровождался приготовлением мороженого.) Оказывается, температуру такой смеси можно понизить до -20°C .

Чаще всего для охлаждения используют поваренную соль NaCl . Но подойдут и более редкие вещества: KCl , NaNO_3 и т.п. «Чемпионом» по понижению температуры оказывается CaCl_2 . Смешав 42 г этой соли и 100 г истолченного льда, можно получить температуру -55°C !

А каковы результаты ваших опытов? И что ответить Уокеру?

Какая вода замерзнет быстрее?

«В холодных странах, таких, как Канада или Исландия, хорошо известно, что горячая вода, выставленная в мороз на улицу, замерзает скорее, чем холодная. Возможно, вам это покажется вздором, однако это отнюдь не бабушкины сказки: даже Фрэнсис Бэкон в свое время отмечал данный факт.

Наполните несколько сосудов различной формы теплой и холодной водой и поставьте их в морозный день за окно... И не удивляйтесь, если в каком-либо



из сосудов теплая вода замерзнет раньше, чем холодная, а попытайтесь объяснить, почему» (Дж.Уокер).

К этому трудно что-либо добавить, кроме, быть может, некоторых советов: в качестве сосудов различной формы возьмите бутылки с узкими горлышками и широкие банки. И еще одно: подумайте, как изменится температура жидкости, если понизить давление над ее поверхностью и, тем самым, дать возможность жидкости испаряться более интенсивно. (Можно провести и соответствующий эксперимент, используя для понижения давления обычный пылесос.)

На катке

Чтобы уменьшить трение, в технике применяются смазки. Эту роль могут выполнять различные материалы, иногда самые, казалось бы, неподходящие. Для примера расскажем о случае, когда роль смазки сыграла... сталь.

В конце прошлого века английский промышленник Гарвей прислал в Россию образцы новых броневых плит для защиты кораблей. На испытаниях снаряды тяжелых орудий, вместо того чтобы пробивать плиты, сами разбивались о броню, не принося вреда тому, что могло скрываться за ней. Но вот русские попросили повторить испытания. И снаряды начали разбивать броневые плиты (а позже, после некоторых усовершенствований, — и пробивать в них отверстия).

Все дело оказалось в том, что теперь снаряды были снабжены специальными колпачками из мягкой стали. Колпачок расплющивался, плавился и, с одной стороны, мешал снаряду расколоться, а с другой — служил своеобразной смазкой при его прохождении сквозь броневую плиту. Изобретателем колпачка был талантливый русский ученый и моряк адмирал Макаров.

Итак, при огромных давлениях сталь может служить смазкой. А «почему коньки скользят по льду?» (Дж.Уокер). Что является смазкой в этом случае?

«Сквозь волнистые туманы...»

Влажной зимой дни часто бывают туманными. Принято считать, что туман имеет серый цвет, но это не всегда так.

«Французский художник Моне приехал в Лондон и написал Вестминстерское аббатство. Работал Моне в обыкновенный лондонский туманный день. На картине Моне готические очертания аббатства едва выступают из тумана. Написана картина виртуозно.

Когда картина была выставлена, она произвела смятение среди лондонцев. Они были поражены, что туман у Моне был окрашен в багровый цвет, тогда как всем известно, что цвет тумана серый.

Дерзость Моне вызвала сначала возмущение. Но возмущавшиеся, выйдя на лондонские улицы, взгляделись в



туман и впервые заметили, что он действительно багровый», — так писал К. Паустовский в своей книге «Золотая роза».

Вот и Уокер тоже согласен с Моне: «Почему дымка, витающая над городом, имеет коричневый оттенок?» — спрашивает он.

Вопрос о причинах цветного тумана — не легкий вопрос. Не случайно мы приберегли его на самый конец. Понаблюдайте за цветом тумана в городе и в сельской местности. А может быть, вы даже сумеете придумать опыты и получить «туманы» разной окраски?

А.Варламов

У многих журналов есть рубрика «О чем писал наш журнал сто лет назад», из которой читатель узнает об интересных или курьезных, с современной точки зрения, фактах, имевших место в те времена. Нашему журналу до векового юбилея еще далеко, так что нам такую рубрику заводить пока рано. Впрочем, попытаемся представить, о чем мог бы писать журнал, аналогичный нашему, сто лет тому назад.

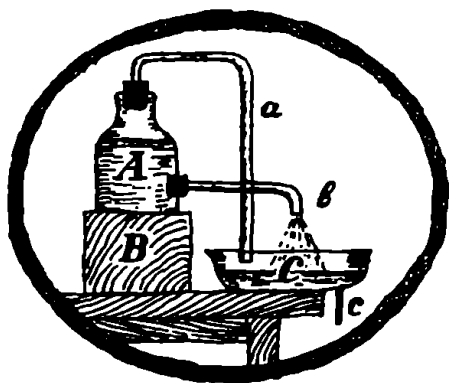
Тогда еще не были открыты явления сверхпроводимости и сверхтекучести, никто даже не подозревал о возможности создания лазеров и термоядерных реакторов, спутников и космических ракет. Поэтому на первый взгляд кажется, что любознательным гимназистам, интересующимся физикой, читать было не о чем. Однако читали, и небезуспешно – выросло поколение замечательных физиков, создавших сложную современную физическую науку.

Недавно автору этих строк в руки попала ветхая книга Б.Доната «Физика в играх для юношества», изданная в конце XIX века. В те времена изучение физики носило более «опытный», наглядный и занимательный характер. Приведем описание нескольких забавных экспериментов, взятых из этой книги.

Фонтан, бьющий по приказанию

Устройство такого фонтана показано на первом рисунке. Бутыль *A* (вместимостью около одного литра) с двумя горлышками (верхним и боковым) установлена на подставку *B*, рядом с которой находится резервуар *C* для сбора воды. Оба горлышка закрыты резиновыми пробками с вставленными в них изогнутыми трубками *a* и *b*. Трубка *b* служит для основного стока фонтана, а трубка *a*, конец которой немного не доходит до дна резервуара, играет роль своеобразного замка.

Если трубка *a* открыта, воздух поступает в бутылку, и вода свободно вытекает из нее через трубку *b*, увеличивая количество воды в резервуаре. Как только уровень воды достигает отверстия трубки *a*, доступ воздуха в бутылку прекращается, и вода перестает течь из трубки *b* – фонтан иссяк!



Для того чтобы он заработал вновь, необходимо открыть отверстие в трубке *a*. Для этой цели служит трубка *c* в дне резервуара. Если ее диаметр меньше диаметра трубки *b*, во время работы фонтана приток воды в резервуар превышает ее расход, и в некоторый момент отверстие трубки *a* закроется – фонтан тут же «умолкнет». Когда же количество воды убавится настолько, что конец трубки *a* откроется, фонтан заработает снова.

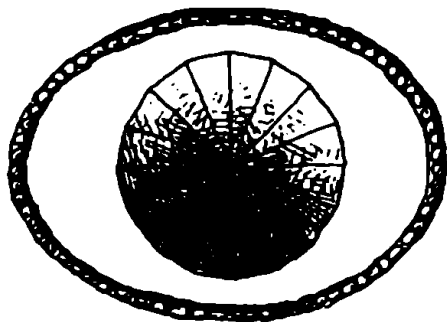


Скрыв от посторонних глаз внутреннее устройство фонтана (например, оклеив бутылку древесной корой), этот опыт можно показывать в качестве фокуса. Пусть себе фонтан то бьет, то «молчит», а вы, глядя на конец трубки *a*, в соответствующие моменты ему приказываете: «Фонтан, бей! Фонтан, остановись!».

Говорящая фигурка

Этот опыт основан на волновых свойствах звука, и для него вам понадобятся два вогнутых сферических зеркала с радиусом кривизны порядка одного метра.

Так как эти зеркала должны отражать звук, а не свет, то в особом блеске их поверхности надобности нет. Достаточно, чтобы размеры шероховатостей и неровностей были значительно меньше длины звуковой волны. Характерные длины волн человеческой речи составляют от десятков сантиметров до нескольких метров, так что неровности зеркальной поверхности не должны превышать 1–2 см. (Проведите аналогичный ана-



лиз для световых волн и получите численную оценку допустимых шероховатостей оптических зеркал.)

Такое зеркало нетрудно изготовить самостоятельно. Возьмите кусок картона, разрежьте его на одинаковые остроугольные равнобедренные треугольники (чем их будет

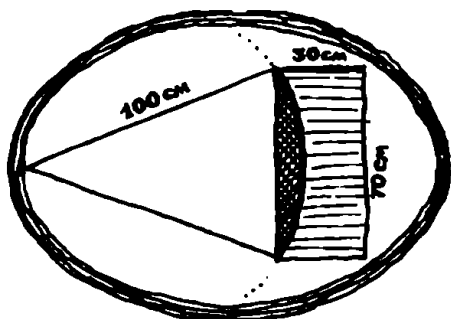
больше, тем лучше), соберите из них пирамидальную поверхность и соседние боковые стороны треугольников сшейте. Чем более длинные треугольники вы возьмете, тем шире у вас получится зеркало. Для опыта вполне подойдут треугольники с длиной боковой стороны 30 — 40 см.

Сшитый картон намочите, чтобы он размяк и легко растягивался, и при помощи большого плоского блюда придайте ему требуемую форму. Затем окончательно разровняйте зеркало по лекалу, которое тоже можно сделать самостоятельно. На куске картона длиной около 70 см и шириной 30 см начертите дугу окружности радиусом 1 м так, чтобы захватить ею всю длину картонного листа. Теперь аккуратно вырежьте полученную часть круга — лекало готово. Вставьте лекало в зеркало и добейтесь того, чтобы оно свободно вращалось внутри зеркала, не задевая за неровности. Сделав это, поставьте зеркало в тень хорошенько просушиться.

Для нашего опыта понадобятся два, по возможности одинаковых, зеркала. Повесьте их на стены в двух комнатах одно напротив другого так, чтобы между зеркалами находилась дверь. (Расстояние от стены до стены может достигать десяти метров.) Зеркала обязательно должны висеть строго напротив друг друга. Чтобы проверить это, в фокусе одного зеркала (он находится на расстоянии, равном половине радиуса, от вершины зеркала) поместите часы.

Их ход должен быть слышен громче всего в фокусе второго зеркала.

Теперь, когда система построена, в фокусе одного зеркала поставьте куклу или какую-нибудь фигурку и объявите собравшимся друзьям, что она умеет отвечать на са-



мые разные вопросы, которые ей будут шептать на ухо. Второе зеркало от зрителей нужно как-то скрыть, например занавесить дверь простыней или ярко осветить комнату с фигуркой и оставить затемненной вторую комнату.

Разумеется, один вы с этим опытом не справитесь – у фокуса дальнего зеркала должен находиться ваш надежный помощник. Здесь он услышит все, что будут говорить фигурке на ухо, и сможет отвечать на задаваемые вопросы. А в соседней комнате эти ответы будут восприниматься исходящими от самой фигурки. Объяснить это нетрудно. Если источник звука находится в фокусе одного зеркала, то, отразившись от него, волны будут распространяться вдоль оси обоих зеркал и после отражения от второго зеркала соберутся в его фокусе.

Еще лучше, если у помощника будет рупор, через который можно слушать вопросы и давать ответы. Кроме того что рупор усиливает звуки, он сильно искажает голоса, а это, безусловно, еще усилит эффект опыта.

Поющий бокал

Оказывается, из тонкостенного стеклянного бокала можно извлекать различные музыкальные звуки, причем весьма своеобразным способом. Впрочем, судите сами.

Вымойте руки горячей водой, чтобы удалить с пальцев жировые вещества. Обмокните палец в воду и аккуратно водите им по краю бокала, постоянно смачивая палец водой. Сначала бокал будет издавать неприятный скрипящий звук, но затем, когда края хорошо оботрутятся, звуки станут мелодичнее. Меняя силу нажима пальца, вы сможете менять и тон извлекаемого из бокала звука. Кроме того, высота тона зависит еще от размеров бокала, толщины его стенок и количества содержимого в нем.



Заметим, что не любой бокал способен издавать приятные поющие звуки, поэтому поиск подходящего бокала может оказаться долгим и хлопотливым. Лучше всего поют (а не скрипят) очень тонкие бокалы, имеющие форму параболоида вращения, на длинной и тонкой ножке. Тон звучания можно менять, подливая в бокал воду – чем больше в бокале будет воды, тем ниже он будет звучать.

(И еще одно замечание к наблюдению. Когда уровень воды поднимется до середины бокала, на ее поверхности появятся волны, возникающие из-за сотрясения стенок бокала. Сильнее всего волнение будет в том месте, где в данный момент находится ваш палец.)

Интересно, что на основе описанного явления знаменитый американский ученый Бенджамин Франклин создал весьма оригинальный музыкальный инструмент. Целый ряд хорошо отшлифованных стеклянных чашек, просверленных в середине, на одинаковых расстояниях друг от друга прикреплялись к одной общей оси. Под ящиком, в котором находилась эта система, была приделана педаль (как у швейной машины), приводящая ось во вращение. От простого прикосновения мокрых пальцев к вращающимся чашкам окружающие звуки усиливались до фортиссимо или падали до шепота.

Сейчас трудно представить себе этот удивительный музыкальный инструмент, но люди, слышавшие его, уверяли, будто бы гармония его звуков потрясающим образом действовала как на самого исполнителя, так и на слушателей. В 1763 году свой образец этого инструмента Франклин подарил англичанке мисс Дэвис. В течение нескольких лет она демонстрировала его во многих странах Европы, а затем, к сожалению, этот удивительный инструмент бесследно исчез.

Зеркало, которое не путает правой и левой сторон

Возьмите два обычных зеркала без рам, составьте их края под прямым углом друг к другу зеркальной стороной внутрь и посмотрите прямо в угол вдоль его биссектрисы. Вы увидите свое изображение. Затем закройте один глаз, например правый, – ваше изображение закроет тоже правый глаз; поднимите левую руку – в зеркале окажется поднятой также левая рука. Почему?

Это понять нетрудно. Изображение своей левой половины в левом зеркале непосредственно вы видеть не можете, так как (следуя закону отражения) отраженные от него лучи идут не к вам, а в противоположную сторону и на своем пути встречают правое зеркало. В нем-то и получается окончательное изображе-

ние вашей левой половины, которое вы увидите, так как правое зеркало расположено соответствующим для этого образом. Другими словами, одно зеркало незаметно «передает» изображение другому, в результате получается не одно отражение, а два, так что левая половина естественно переходит снова в левую, а правая — в правую.



Теперь попробуйте плавно увеличивать угол раствора зеркал. Вначале пропадет середина лица с носом, потом останутся только одни уши, а при некотором угле изображение лица исчезнет вовсе, но при угле, близком к 180° , появится обычное изображение лица в плоском зеркале. Если опыт проводить в обратном порядке, то все будет происходить наоборот: сначала лицо начнет расплываться в ширину, нос распухнет, рот вытянется в длину, потом на переносице появится третий глаз и... тому подобное.

ЧТО ПРОИСХОДИТ НА ГРАНИЦЕ

А.Боровой, Ю.Климов

В школьном курсе физики не так уж много места отводится явлениям, происходящим на границе жидкости с другой средой, — поверхностному натяжению, смачиванию, капиллярности. Вместе с тем, с этими явлениями связано много интересных наблюдений и опытов, известных с давних времен и придуманных буквально сегодня, очень сложных и совсем простых. О некоторых из них мы и хотим рассказать.

Движущаяся «ракета» и расходящиеся кольца

Вырежьте из бумаги «ракету» такой формы, как показано на рисунке 1,а. В точку А поместите капельку концентрированного мыльного раствора или маленький кусочек мыла. Если теперь опустить ракету на спокойную поверхность воды, то она начнет двигаться.

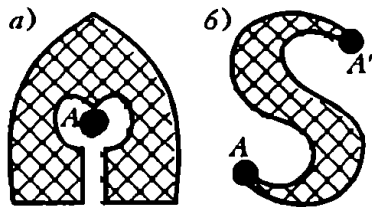


Рис. 1

Вместо «ракеты» можно сделать вертушку в форме буквы S и поместить кусочки мыла в точки А и А' (рис.1,б). Понаблюдайте, в

какую сторону будет вращаться такая вертушка.

Следующий опыт требует некоторой предварительной тренировки, но зато дает очень красивый результат. Пером с тушью касаются поверхности чистой воды — по воде расползается окрашенное пятно. Теперь центра этого пятна касаются намыленной палочкой или просто кусочком мыла — пятно разрывается и превращается в тонкое кольцо. Снова его центра касаются пером (можно при этом использовать тушь другого цвета), затем в ход идет намыленная палочка и т.д. На поверхности воды возникает орнамент из разноцветных концентрических колец. Достаточно осторожно положить сверху промокательную бумагу, и краси-

Опубликовано в «Кванте» №11 за 1982 год.

вые узоры перейдут на нее. Этот опыт нашел практическое применение. С его помощью в Японии изготавливают бумагу с самыми разнообразными узорами.

Описанные эксперименты легко понять, если поверхность жидкости считать натянутой пленкой. Впервые такую модель предложил известный английский физик Томас Юнг. В декабре 1804 года Юнг написал работу, в которой с помощью аналогии «поверхность жидкости – упругая пленка» объяснялось поведение жидкости в капиллярах. Вскоре модель, подтвержденная новыми наблюдениями и опытами, получила всеобщее признание.

Итак, поверхность чистой воды – натянутая пленка, а мыльная или подкрашенная вода – такая же пленка, но менее упругая. В результате водяная пленка перетягивает мыльную или подкрашенную, увлекая за собой «ракету» или окрашенное тушью кольцо.

Существует много способов экспериментального определения степени «упругости» поверхностной пленки – так называемого коэффициента поверхностного натяжения σ . Один из наиболее простых – с помощью отрывающихся капель. Если взять пипетку с вытянутым носиком и, наполнив ее водой, осторожно и медленно начать выдавливать каплю, то можно наблюдать, как она постепенно увеличивается, изменяет свою форму и, наконец, отрывается от пипетки (рис.2).

Заметьте, что капля отрывается только тогда, когда достигает определенных размеров. Пока капля недостаточно велика, поверхностное натяжение удерживает ее на кончике пипетки. Очевидно, что в момент отрыва сила тяжести $m\vec{g}$ капли становится равной по модулю силе поверхностного натяжения \vec{F} :

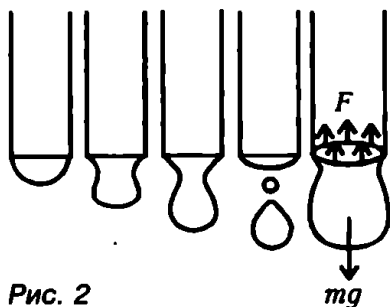


Рис. 2

$$mg = F, \text{ или } mg = 2\pi r\sigma,$$

где r – радиус шейки, образующейся у капли перед отрывом.

Отсчитав, скажем, 100 капель и найдя с помощью весов их суммарную массу $M = 100 m$, можно определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r} = \frac{Mg}{200\pi r}.$$

Но, к сожалению, определить очень неточно. Во-первых, нелегко измерить радиус шейки (часто для этого отрывающуюся каплю в увеличенном виде проектируют на экран и там уже производят измерения). Во-вторых, отрыв капли оказывается более сложным процессом, чем просто разрыв шейки (в частности, одновременно с основной каплей образуется еще одна, маленькая, капелька). Есть и еще несколько источников ошибок в этом эксперименте. Однако, если мы хотим определить лишь порядок величины или качественно сравнить поверхностные натяжения, скажем, чистой воды и мыльного раствора, вполне допустимо воспользоваться пипеткой, а радиус шейки при этом считать равным внутреннему радиусу носика пипетки (измерить последний можно, например, с помощью проволоочки известной толщины, плотно входящей в пипетку).

Для справок приведем значения σ , в единицах СИ, для некоторых жидкостей: вода (при 20 °C) – 0,073, раствор мыла в воде – 0,04, оливковое масло – 0,033, керосин – 0,026, ртуть (в воздухе со временем уменьшается) – 0,5 – 0,4 Н/м.

Рябь на поверхности воды

Оказывается, благодаря силам поверхностного натяжения возникают так называемые капиллярные волны, т.е. рябь на воде. Наблюдать их можно при помощи той же пипетки. Наполните тарелку водой и, держа пипетку на небольшом расстоянии от ее поверхности, капайте воду – быстро разбегающиеся концентрические волны и будут волнами поверхностного натяжения. (Вообще, механизм образования и распространения волн на воде – вещь не простая. Здесь участвуют и сила тяжести, и поверхностные явления. Но для объяснения происхождения мелкой ряби вполне можно использовать модель упругой пленки.)

Существует легенда о том, что в древности ловцы жемчуга, добывавшие его со дна Эгейского моря, перед тем как нырнуть, набирали в рот немного оливкового масла. Потом, уже находясь на дне, они выпускали масло, которое поднималось на поверхность и образовывало спокойное «окно», уничтожая рябь на поверхности. Проникающий через «окно» свет позволял ловцам лучше ориентироваться на дне моря.

Вот еще одно интересное наблюдение. «В штилевую погоду на спокойной поверхности моря ясно видны своеобразные узоры, напоминающие муар... Приглядевшись, легко заметить, что в пределах более яркого цветного фона возникает рябь и что светлые пятна и полосы на этом фоне соответствуют участкам поверхности моря, на которых эта рябь погашена», – писал

известный геофизик академик В. В. Шулейкин. Под его руководством были проведены опыты по измерению коэффициента поверхностного натяжения морской воды методом отрыва конуса. Они показали, что там, где существует рябь, коэффициент такой же, как у чистой воды, а в области светлых пятен — существенно меньше. Отсюда был сделан вывод, что рябь на поверхности моря гасится пленками жира или каких-то других веществ. Правда, объяснить это оказалось делом не простым.

Как показали исследования, поверхностные пленки гасят, в основном, небольшие волны, но они могут также препятствовать появлению пены на гребнях волн во время шторма. И эта сравнительно скромная помощь может сыграть свою роль: «для практики важно погасить лишь пенистые гребни, представляющие иногда серьезную опасность для корабля или, тем более, для спускаемой шлюпки» (В. В. Шулейкин).

Какую форму имеет капля?

Ответ на этот вопрос зависит от целого ряда обстоятельств. Если бы все определялось только силами поверхностного натяжения, капля всегда принимала бы такую форму, при которой ее поверхность минимальна, т.е. форму шара. В условиях земного тяготения под действием силы тяжести капли чаще всего получаются сплюснутыми, лишь очень маленькие капельки остаются сферическими. А нельзя ли исключить силу тяжести, скомпенсировать ее какой-нибудь еще силой?

В 1843 году бельгийский физик Плато поставил опыт, который вскоре получил его имя и вошел во все учебники физики. Плато подобрал концентрацию раствора спирта в воде таким образом, что плотность раствора оказалась равной плотности оливкового масла, и ввел в раствор каплю масла. В этом случае архимедова сила выталкивания уравнивает силу тяжести капли, а поверхностное

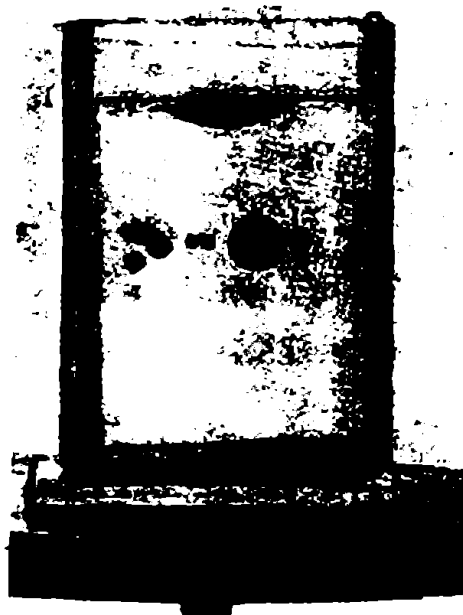


Рис. 3. Капли анилина, взвешенные в воде, имеют сферическую форму вне зависимости от их размера



4. Последовательные кадры фильма о высыхании капли раствора сульфита

натяжение обуславливает ее сферическую форму (рис.3).

Интересно, что в состоянии невесомости можно получить большие капли-шары различных жидкостей. Такие капли наблюдались, например, во время опытов по электросварке в космосе. Состояли они из расплавленного металла.

В домашних условиях можно повторить опыт Плато, используя касторовое масло и воду. Плотность масла чуть-чуть меньше плотности воды, поэтому если капать в него чистую воду, то медленно опускающиеся водяные капли будут иметь практически шаровую форму. Капли легко окрасить в разные цвета акварельными красками, и тогда в стакане с маслом возникает картина, напоминающая висющие разноцветные шары.

Более трудный, но и более эффектный опыт получается с жидкой эпоксидной смолой и раствором соли. Насыпав на дно банки соль, можно получить раствор с убывающей по высоте концентрацией, а следовательно, и плотностью. В таком растворе капля смолы будет висеть на определенной высоте. Рецепт окраски капли предоставляем выбрать самим читателям.

След от высохшей капли

Одно из загадочных на первый взгляд явлений, связанных со смачиванием, возникает при высыхании капли какого-либо раствора. Сделаем такой несложный опыт -- поместим на стеклянную пластинку капли раствора соли (не очень концентрированного) и дадим им высохнуть. Естественно, на месте капель образуются светлые пятнышки соли. Так вот, загадочно то, что соль осаждается не равномерным слоем, а в виде чередующихся колец (рис.4). Оказывается, при-

чиной тому – скачкообразный характер высыхания капли. Для объяснения этого явления мы приведем отрывок из книги Я.Е. Гегузина «Капля» (М.: Наука, 1973), которую, кстати сказать, очень советуем прочитать:

«С каплей происходит следующее. Вода со всей ее поверхности испаряется равномерно. Легко понять, что по мере испарения влаги концентрация растворенной соли будет возрастать, и раньше всего кристаллики начнут выпадать там, где избыточная концентрация соли будет наибольшей. Это будет в самой тонкой части капли, т.е. вдоль ее периметра. Именно вдоль периметра кристаллики и выпадут. Жидкость капли, смачивая выпадающие кристаллики, как бы приклеивается к ним. Поэтому капля, теряя жидкость, должна менять свою форму, становиться более плоской – ведь ее объем уменьшается, а периметр остается неизменным.

В начале процесса высыхания форма капли, лежащей на стекле, была равновесной. Это означает, что из всех возможных форм осуществилась та, при которой энергия поверхности, граничащей с воздухом и стеклом, – наименьшая при данном объеме капли...

Чем больше испаряется влаги, тем больше искажается форма капли, и на каком-то этапе капля оторвется от кристалликов на периметре и примет равновесную форму. А затем – все сначала... пока капля не испарится, оставив после себя пятно, состоящее из концентрических колец кристалликов соли».

ЧТО ТАКОЕ СТРОБОСКОП

С. Гаврилов

Часто на киноэкранах можно наблюдать такое странное явление: у движущегося автомобиля колеса вращаются в обратном направлении. Это — пример так называемого стробоскопического эффекта. Прежде чем начать разговор о нем, давайте проведем несложный эксперимент.

Из плотной бумаги вырежем круг диаметром около двадцати сантиметров и на краю его напишем какую-нибудь букву размером приблизительно в 1 см. Диск этот насадим на ось, например на вязальную спицу. Если спицу быстро раскрутить, буква превратится в сплошную темную полосу. Казалось бы, разглядеть букву, не останавливая диск, невозможно. Но это не так.

Вырежем еще один такой же круг и прорежем по его радиусу щель шириной 2 — 3 мм и длиной 4 — 5 см. Насадим этот круг на ту же ось так, чтобы сквозь прорезь на нем была видна буква на первом диске. Опять закрутим ось, но теперь даже при большой скорости вращения мы будем видеть букву практически неподвижной. (Чтобы добиться максимальной четкости изображения, нужно опытным путем подобрать оптимальный угол наблюдения.)

Как же получилось, что буква, которая раньше расплывалась и была недоступной для нашего зрения, теперь стала хорошо видимой? Попробуем разобраться.

Предположим, что диск освещается (или делается видимым глазу каким-либо иным способом) не все время, а периодически, через равные промежутки времени. Когда период освещения точно совпадает с периодом обращения диска, при каждой вспышке мы будем видеть диск в одной и той же стадии вращения. И если время между вспышками не превышает времени сохранения зрительных ощущений, что составляет примерно 0,3 секунды (а в случае особо возбудимых глаз 0,5 с),

Опубликовано в «Кванте» №1 за 1983 год.

отдельные мгновенные изображения диска сольются в одно «непрерывное» изображение — диск будет казаться неподвижным. Если же интервалы между двумя последовательными вспышками немного больше периода вращения диска, то во время каждой последующей вспышки мы будем видеть диск во все более поздних стадиях движения — нам будет казаться, что диск медленно вращается в том же направлении, в каком это происходит в действительности. В случае если период освещения несколько меньше периода вращения, мы каждый раз будем видеть диск во все более ранних стадиях движения, и нам покажется, что диск медленно вращается в противоположном направлении. (Очевидно, что период кажущегося вращения зависит от разности между периодами освещения и действительного вращения диска.)

Эффект, о котором идет речь, называется стробоскопическим, а прибор, позволяющий «останавливать» или «замедлять» движущиеся тела, — стробоскопом. Название произошло от греческих слов «стробос» — кружение и «скопос» — наблюдение.

Простейший стробоскоп представляет собой диск из тонкого картона, по радиусу которого вырезана щель шириной 2—3 мм. Диск можно закрепить на оси ручного точила (вместо точильного круга) или механической дрели. Изменяя скорость вращения диска, можно добиться, например, «остановки» колебаний маятника стенных часов или грузика на пружине. Для этого нужно лишь посмотреть на маятник или грузик сквозь крутящийся диск.

Если в диске прорезать не одну, а несколько (например, 10 или 20) щелей на равном расстоянии друг от друга, то можно будет наблюдать и более быстрые движения, скажем — вращение лопастей вентилятора. Лопастей работающего вентилятора практически невидимы для нас — они сливаются в один полупрозрачный диск. А с помощью стробоскопа их можно разглядеть, не останавливая вентилятор. Тем-то и полезен стробоскоп, что он

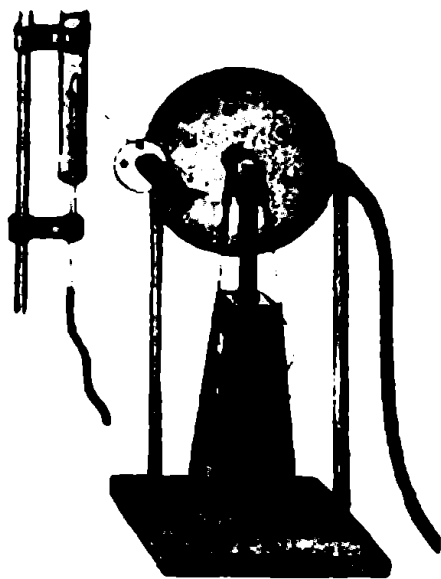


Рис. 1. Фотография одного из старинных стробоскопов

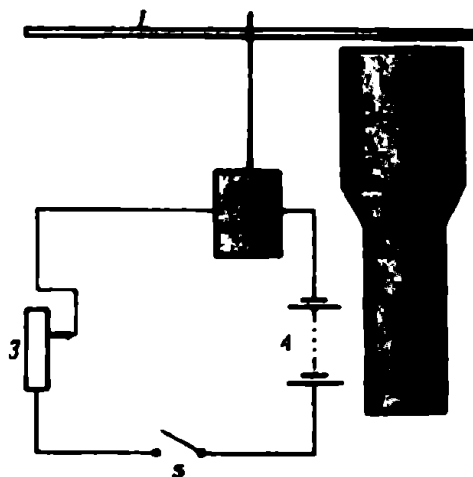


Рис.2. Стробоскоп, создающий прерывистое освещение: 1 – диск с прорезями, 2 – электродвигатель, 3 – реостат, 4 – источник тока, 5 – ключ, 6 – картонная труба, 7 – фонарь

позволяет наблюдать столь быстрые процессы, за которыми наш глаз, из-за его инерционности, уследить не в состоянии. Схема одного из подобных опытов приведена на рисунке 1.

Но еще удобнее работать со стробоскопом, который создает прерывистое освещение (рис.2). Для этого вращающийся картонный диск с прорезями нужно поместить перед источником света. В качестве источника света годится обычный круглый фонарь, работающий от трех батареек. Он дает достаточно света, и его световой пучок

хорошо сфокусирован. Диск можно приводить в движение моторчиком от электроконструктора. Чтобы изменять скорость вращения, нужно последовательно с моторчиком включить реостат на 40–50 Ом и менять его сопротивление. Наблюдения проводят в темноте – исследуемый предмет освещается только мигающим светом стробоскопа.

Используя такой стробоскоп, можно, например, измерять скорости и ускорения поступательно движущихся тел. Но, пожалуй, самый эффектный опыт – это наблюдение распада тонкой струи жидкости на капли. Представьте себе, например, несильную струю воды, вытекающую из водопроводного крана. Из гидродинамического принципа неразрывности струи следует, что свободная струя по мере возрастания скорости жидкости (в поле тяжести Земли) должна уменьшаться в сечении. И если бы не поверхностное натяжение, сечение струи уменьшалось бы неограниченно. Наличие же поверхностного натяжения приводит к тому, что при достаточно малом сечении струя начинает распадаться на капли. Объясняется это тем, что энергия поверхностного натяжения сферических капель меньше, чем цилиндрической струи, а любая система всегда стремится к состоянию с наименьшей энергией. Инерционность нашего зрения не позволяет нам разглядеть отдельные капли – струя кажется глазу монолитной и неподвижной. Если же

наблюдать тонкую струю с помощью стробоскопа, видны отдельные капли, как бы висащие в воздухе (рис.3).

Струя, вытекающая из-под крана с большим напором, при стробоскопическом освещении тоже выглядит не так, как мы привыкли ее видеть. Из-за завихрений, возникающих при быстром течении жидкости, струя в каждый момент времени имеет узловатую форму с причудливыми боковыми выростами.

Любопытно, что стробоскопический эффект был известен еще в глубокой древности, на что, например, бесспорно указывают строки из поэмы Лукреция «О природе вещей» (I век до н.э.). Но затем долгое время на него не обращалось никакого внимания. Вновь описания стробоскопических явлений появились лишь в первой половине XIX века в работах Фарадея, Плато и других ученых. Исследователи не сразу поняли, что это не просто забавный оптический обман, а прекрасное средство для изучения быстрых периодических процессов. Однако со временем стробоскоп занял подобающее место в лабораториях и служил верой и правдой вплоть до появления методов мгновенной фотосъемки, позволяющей буквально «остановить мгновение». Так, в XIX веке при помощи стробоскопа были осуществлены исследования в области акустики, механических колебаний, гидродинамики и даже физиологии и зоологии.

Не утратил своего значения стробоскоп и в наши дни. В частности, его применяют, когда нужно измерять или контролировать частоту вращения каких-либо механизмов. Например, во многих высококачественных электропроигрывателях с помощью стробоскопа осуществляется подстройка скорости вращения диска. Для этого на боковую поверхность диска наносят чередующиеся темные и светлые полосы, изображения которых с помощью оптической системы проецируют на экран на панели проигрывателя. Полоски освещаются лампочкой, мигающей со строго постоянной частотой. Она подбирается так, чтобы за время между двумя вспышками край диска про-

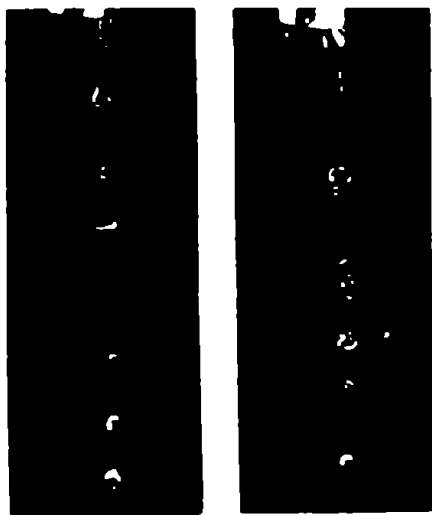


Рис.3. Монолитная струя воды, сфотографированная при стробоскопическом освещении

шел расстояние, равное как раз расстоянию между двумя соседними темными полосками, тогда изображение полос на экране будет неподвижным. Если скорость диска будет отличаться от номинальной, изображение полос начнет двигаться. «Остановить» его можно специальной ручкой регулировки скорости вращения диска.

Еще один пример использования стробоскопического эффекта для современных исследований – создание стробоскопического осциллографа. Этот прибор позволяет наблюдать периодические сигналы длительностью менее 10^{-10} с (это в 100 раз меньше длительности сигналов, «воспринимаемых» обычным высокочастотным осциллографом). Работа такого сверхбыстрого осциллографа аналогична работе простого механического стробоскопа в режиме, когда действительная частота колебаний во много раз больше кажущейся. Только здесь роль стробоскопа выполняет точная и сложная электроника.

А.Боровой

Первое апреля – день веселых розыгрышей, мистификаций и маленьких обманов. Лаборатории «Кванта» тоже захотелось приобщиться к этому празднику. Довольно долго мы раздумывали над тем, как деликатнее обмануть читателя, и, наконец, решили действовать по рецепту: чтобы тебе не поверили, надо говорить чистую правду. Поэтому, если наш рассказ покажется вам по меньшей мере странным, не поленитесь и проверьте сказанное на опыте, прежде чем кричать: «С первым апреля! Никому не веря!».

Знакомый всем сифон

Это незатейливое приспособление для перекачивания жидкости из одного сосуда в другой известно с незапамятных времен. Различные конструкции сифонов изобретал еще Герон Александрийский, живший две тысячи лет тому назад.

Как же устроен простейший сифон? Представьте, что вам надо перелить жидкость из одного сосуда в другой, расположенный ниже первого (рис.1). По каким-то причинам наклонять сосуд и лить жидкость через край неудобно. В таком случае берется гибкая трубка и опускается одним концом в верхний сосуд, другим – в нижний. Это и есть сифон (не случайно слово «сифон» в переводе с греческого означает «трубка», «насос»). Чтобы он начал действовать, его необходимо предварительно заполнить жидкостью. Для этого чаще всего используют простой (но не всегда приятный) способ: опустив в жидкость

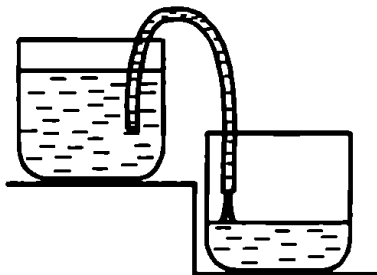


Рис. 1

один конец трубки, ртом отсасывают из нее воздух, зажимают другой конец и быстро погружают его во второй сосуд.

Таким образом, для работы сифона надо иметь

- хотя бы один сосуд;
- предварительно наполненную жидкостью трубку, у которой «выливное» колено опущено ниже уровня жидкости в сосуде;
- атмосферное давление.

Хотите верить, хотите нет, но почти все, что перечислено, на самом деле вовсе не обязательно.

Начнем с атмосферного давления. Действительно ли оно нужно для работы сифона? «Совершенно необходимо, – утверждают многие, – ведь оно подпирает жидкость, не дает ей разорваться внутри трубки на перегибе». В своем роде это утверждение – первоапрельская шутка. Если поместить сифон под колокол воздушного насоса, он будет работать и без атмосферного давления, лишь бы только жидкость не вскипела и пузырьки не перекрыли сечение трубки. Столб жидкости не разрывается благодаря силам молекулярного сцепления.

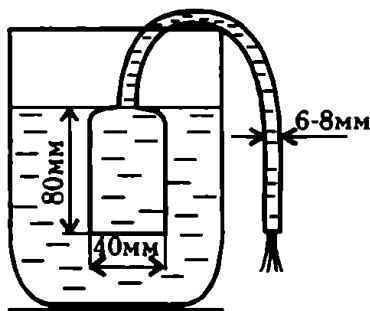


Рис. 2

Теперь о предварительном наполнении трубки жидкостью. Некоторые трубки заполнять не приходится – они это делают сами. Изготовьте трубку, изображенную на рисунке 2. Лучше всего из стекла (правда это трудно), но можно и из жести. Закройте узкий конец пальцем, а широкий опустите в верхний сосуд и резко отпустите палец.

Сифон начнет переливать воду. Почему так получилось, понять совсем нетрудно. Попробуйте это сделать сами.

Существует и другой тип «самонаполняющихся» трубок – фитили. Если сосуды соединить вместо трубки фитилем, жидкость, хотя и медленно, будет перетекать по нему. Здесь вступают «в игру» капиллярные явления.

Остается сказать, что и сама трубка требуется не всегда. Так, в книге Дж. Уокера «Физический фейерверк» можно прочитать про «самоперетекающие» жидкости: «Некоторые жидкости, например жидкий полиэтилен, могут сами вытекать из сосуда, если только дать толчок действию такого «сифона», вылив часть жидкости...». Поскольку нет никакой уверенности в том, что у вас дома хранится жидкий полиэтилен, советуем испытать другие жидкости. Возможно, вам удастся добиться нужного эффекта.

Заметим еще, что существует одна поистине замечательная жидкость, которая может вытекать из сосуда, сама поднимаясь по его стенкам. Это – жидкий гелий, точнее гелий II. Так называют эту жидкость при температуре ниже 2,17 К, когда у нее появляются совершенно удивительные свойства. И прежде всего – сверхтекучесть, т.е. полное отсутствие вязкости¹. Вот что пишут об этом явлении Л.Д.Ландау и А.И.Китайгородский в книге «Физика для всех»:

«...Гелий II способен сам «вылезать» из стакана или пробирки, куда он налит.

На рисунке < см рис.3 > показана схема проведения этого опыта. Пробирку с гелием II помещают в дьюаре над гелиевой ванной. "Ни с того ни с сего" гелий поднимается по стенке пробирки в виде тончайшей совершенно незаметной пленки и перетекает через край; с доньшка пробирки капают капли.

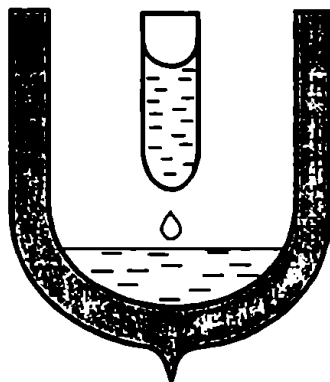


Рис. 3

Надо вспомнить, что благодаря капиллярным силам ... молекулы всякой жидкости, смачивающей стенку сосуда, взбираются вверх по этой стенке и образуют на ней тончайшую пленку, ширина которой по порядку величины равна одной миллионной доле сантиметра. Эта пленочка незаметна для глаза, да и вообще ничем себя не проявляет для обычной вязкой жидкости.

Картина совершенно меняется, если мы имеем дело с лишенным вязкости гелием... Через борт стакана или пробирки поверхностная пленка образует сифон, по которому гелий переливается через край сосуда».

Понять поведение жидкого гелия можно только с точки зрения квантовой механики.

Вот видите, сколько неожиданностей таит в себе обычный сифон.

Оптические иллюзии

«Если на клетке слона прочтешь надпись "буйвол", не верь глазам своим», – так советовал действительный статский советник, директор Пробирной Палатки Козьма Петрович Прутков.

¹ Вязкость жидкости обусловлена трением, возникающим между соседними слоями жидкости при их относительном движении.

Мудрый человек был не совсем прав. В основном, глазам своим можно и должно верить, поскольку наибольшее количество информации об окружающем мире человек получает именно с помощью зрения. Правда иногда эта информация представляется совершенно неправдоподобной, а иногда и вовсе оказывается неверной.

Сделаем совсем простой опыт. Сдвинем большой и указательный пальцы так, чтобы между ними образовалась щель, и посмотрим сквозь нее на свет лампы. Когда щель станет совсем узкой, в центре появится черная полоска. Что это – обман зрения?

Чуть-чуть усложним опыт. Для этого разгладим кусочек алюминиевой фольги (например, обертку от шоколадной конфеты) и сделаем в ней бритвой разрез длиной 4 – 5 см. Если теперь посмотреть одним глазом через этот разрез на свет матовой лампочки, в центре тоже можно увидеть черную полоску. Кроме нее будут видны и более слабые боковые темные полосы.

Опыты действительно очень простые, а объяснить их далеко не просто. Принято считать, что происхождение темных полос связано с дифракцией света – огибанием волнами препятствий. (Возможно, однако, что немалую роль играет здесь и физиологический эффект.)

Но когда же глаза действительно обманывают нас? Почему это происходит? Какие цели при этом преследует природа?²

Сразу скажем, что обманы следует отнести не за счет оптической системы глаза, а за счет того, что нервная система, мозг человека «подправляют», «домысливают» многие образы. Так из плоского рисунка возникает объемный конус (рис.4) или на границе черного и белого появляются контрастные полосы, которые как бы пытаются сделать более резкими переходы освещенности.

Чтобы наблюдать эти полосы (называемые полосами Маха), сделаем следующий опыт. Диск из белого картона с нанесенным на нем черной тушью рисунком (рис.5) приведем в быстрое вращение. Естественно ожидать увидеть в центре белый круг, затем серый и, наконец, черный с относительно плавными переходами освещенности. Однако в действительности картина представляется несколько иной: центральный белый круг опоясывает узкое яркое светлое кольцо, а на границе темного

² Тем, кто всерьез заинтересуется этими и аналогичными вопросами, связанными с физикой зрения, советуем прочитать книгу С.И. Вавилова «Глаз и Солнце».

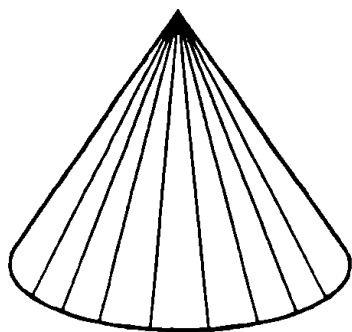


Рис. 4

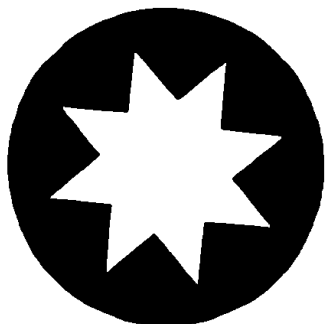


Рис. 5

кольца видна черная полоса максимальной густоты. Это и есть полосы Маха. В некоторых случаях их появление очень полезно. Например, они дают нам возможность читать, четко воспринимая отдельные буквы. Белизна бумаги рядом с буквами кажется ярче, а границы букв – чернее, чем это есть в действительности.

Раз уж речь зашла о вращающихся дисках и связанных с ними оптических обманах, нельзя не вспомнить еще один диск – так называемый диск Бенхэма. С его помощью можно получить красный, голубой и зеленый цвета при смешивании только белого и черного цветов. Из белого картона или плотной белой бумаги вырежем диск радиусом 3–4 см, раскрасим его черной тушью так, как показано на рисунке 6, и приведем во вращение со скоростью от 50 до 200 оборотов в минуту. Можно вращать его вручную, проткнув в центре спицей, или используя какие-либо домашние приспособления, например дрель. Однако лучше всего закрепить диск на оси микромотора для электрических моделей и изменять скорость вращения с помощью реостата. Теперь ярко осветим диск лампой и некоторое время будем внимательно вглядываться в него. Тогда вдоль обода диска можно увидеть красные линии, а около его центра – синие. Изменим направление вращения и увидим, что изменился и порядок цветов: снаружи будут синие круги, у центра – красные.

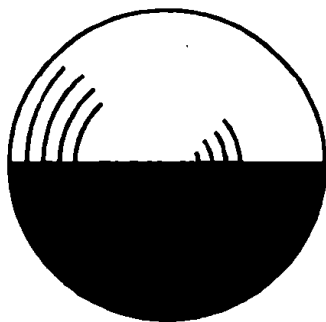


Рис. 6

Варианты раскраски диска возможны самые разные, например такие, как показано на рисунках 7 и 8. Скорость вращения диска тоже можно менять по своему усмотрению.

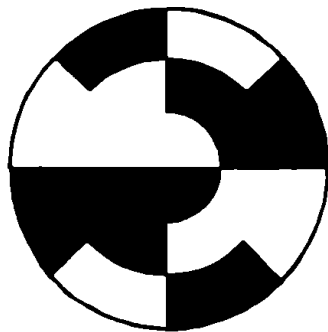


Рис. 7

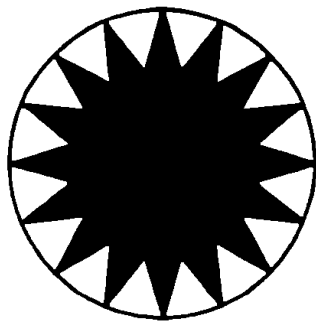


Рис. 8

В некоторых экспериментах диск освещался светом определенной длины волны (например, натриевой лампой) – красные, синие и зеленые цветовые круги не пропадали.

Как же объяснить этот опыт? Предлагались различные гипотезы, многие из них оказались несостоятельными. Сейчас, например, в популярной литературе можно прочесть следующее объяснение: чередование белого и черного цветов перед глазами рождает нервные импульсы, которые поступают в мозг; определенная частота этих импульсов и вызывает ощущение определенного цвета.

В. Майский

«Прочный», «непрочный» — этими терминами мы часто пользуемся и в быту, и в технике, характеризуя различные предметы и материалы. А что такое «прочность» и как ее можно измерить?

Рыболовам, например, хорошо известен простой способ определения прочности лески: привязанный за один конец отрезок лески нагружается различными гирями; максимальная нагрузка, выдерживаемая леской, и есть ее прочность на растяжение. Этим методом можно исследовать на прочность и другие материалы.

От чего зависит, например, прочность на растяжение? Во-первых, от площади поперечного сечения. Так, для разрыва лески диаметром 0,1 мм необходима сила порядка 50 Н, а леска диаметром 0,5 мм может выдержать вес взрослого человека. Для того чтобы исключить зависимость от толщины образца, вводится специальное понятие — предел прочности. Это максимальное напряжение, выдерживаемое образцом без разрушения.

Во-вторых, прочность материала зависит от его температуры. У металлов, скажем, при повышении температуры предел прочности уменьшается (соответствующие графики зависимости предела прочности от температуры для различных металлов приведены, например, в «Справочнике по элементарной физике» Н. И. Кошкина и М. Г. Ширкевича).

А может ли прочность зависеть от ... длины? На первый взгляд кажется, что нет, и для большинства случаев это действительно так. Но есть материал, прочность которого зависит от длины образца. Этот материал — шерсть.

На необычных свойствах шерсти была основана одна из задач IV Турнира юных физиков. Вот ее условие:

Опубликовано в «Кванте» №12 за 1983 год. (Когда автор написал эту статью, он учился в 10 классе 179 московской школы.)

Шерстяная нить сплетена из множества отдельных ворсинок. Исследуйте прочность такой нити на разрыв в зависимости от ее длины. Объясните результаты эксперимента.

Первое, что потребовалось, это подобрать подходящий объект для исследования. После нескольких первых опытов выбор пал на тонкую, но довольно прочную шерстяную нитку (для ее разрыва требовалось усилие от 2 до 4 Н). Во время этих опытов было установлено следующее:

а) для образцов одной и той же длины разброс значений силы, разрывающей нить, очень велик; поэтому для получения достоверного результата необходимо большое число опытов;

б) при длительном воздействии на нить она сильно вытягивается и может порваться при силе, существенно меньшей допустимой; следовательно, установка должна быть по возможности простой, чтобы проведение самого опыта не занимало много времени.

В ходе поисков были придуманы и опробованы различные устройства. Это и подвешивание груза к нити, закрепленной за один конец, и использование рычага с изменяемым отношением плеч, и применение соленоида с сердечником (так называемые электромагнитные весы).

После многих проб выбор пал на одну из наиболее простых установок, сделанную на основе обычного школьного динамометра (максимальное показание 4 Н, цена деления 0,1 Н). К основанию динамометра была прикреплена линейка для измерения длины нити. На проволоочный стержень, которым заканчивается пружина динамометра, был насажен движок, могущий двигаться по шкале с небольшим трением. С его помощью фиксировались показания динамометра. К крючку динамометра привязывался пучок нитей (10 — 15 штук). Из пучка выбиралась одна нить, по линейке измерялась ее длина, а затем нить резко тянулась за свободный конец. Стрелка, двигаясь по шкале динамометра, толкала движок, после разрыва нити стрелка

возвращалась в исходное положение, а движок указывал значение силы, при которой произошел разрыв нити, т.е. прочность образца.

Для опытов использовались нити длиной 2, 3, от 5 до 30 с интервалом 5 и, наконец, 40 см. Для каждой длины проводилось 10 — 15 опытов и находи-

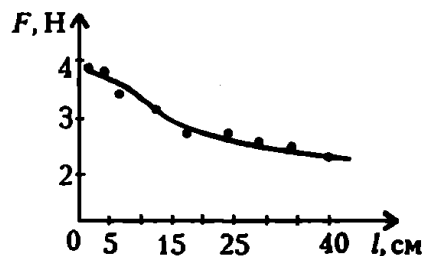


Рис. 1

лось среднее значение прочности нити. По полученным данным был построен график зависимости прочности шерстяной нити от ее длины (рис.1). Из графика видно, что по мере увеличения длины образца прочность нити уменьшается. Как это можно объяснить?

Оказывается, все дело во внутреннем устройстве шерстяных нитей. Каждая нить состоит из большого числа отдельных ворсинок толщиной 30—50 мкм, скрученных между собой. Длина разных ворсинок — во время опытов было исследовано около 100 ворсинок — разная: от 4 до 40 см, при этом средняя длина оказалась равной 8,1 см, в интервал от 4 до 13 см попало 89% общего числа ворсинок, а очень коротких и очень длинных ворсинок было совсем мало.

Рассмотрим предельно упрощенную модель — нить, состоящую из большого числа абсолютно одинаковых ворсинок (одинаковой длины, площади поперечного сечения и прочности). Ворсинки свиты между собой так, что в каждом сечении нити количество ворсинок одно и то же. Исключение составляют лишь некоторые участки — будем называть их дефектами, где в силу тех или иных причин толщина нити уменьшена.

Допустим, что нить имеет длину, большую длины одной ворсинки. Как известно из практики, рвется всегда там, где тонко. Это справедливо и по отношению к нашей нити: для разрыва утоньшенного участка нити требуется сила, меньшая той, которая необходима для разрыва остальной части нити. Обозначим первую силу через F_1 , а вторую — через F_1' . Поскольку ворсинок много, можно считать, что дефекты распределены по нити равномерно и что вероятность обнаружения на выбранном образце хотя бы одного дефекта зависит только от длины образца l . Если для участка единичной длины вероятность наличия дефекта равна α , то вероятность отсутствия дефекта на этом участке будет $(1 - \alpha)$, а на всей длине $-(1 - \alpha)^l$. Это означает, что в n опытах нить будет $n(1 - \alpha)^l$ раз разрываться при силе F_1' и $n(1 - (1 - \alpha)^l)$ раз — при силе F_1 . Тогда средняя сила, разрывающая нить, будет равна

$$F = \frac{n(1 - \alpha)^l F_1' + n(1 - (1 - \alpha)^l) F_1}{n} = F_1 + (1 - \alpha)^l (F_1' - F_1).$$

График зависимости $F = F(l)$ изображен на рисунке 2. Из графика видно, что при бесконечно большом увеличении длины нити средняя сила убывает до значения F_1 , а при уменьшении

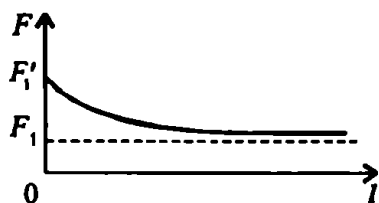


Рис. 2

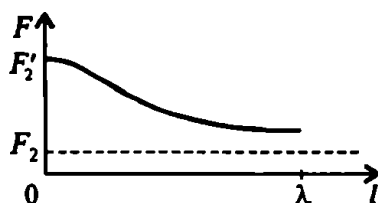


Рис. 3

длины до нуля она возрастает, приближаясь к значению F_1' . В эксперименте тоже наблюдалось уменьшение прочности нити при возрастании ее длины (см. рис.1.).

Предположим теперь, что длина нити порядка длины ворсинки и меньше. Тогда вероятность наличия дефекта в нити невелика, и основную роль в изменении прочности нити играет другой фактор: при разрыве нити ворсинки не рвутся, а лишь проскальзывают друг относительно друга. Очевидно, что сила, вызывающая проскальзывание (обозначим ее через F_2), значительно меньше силы, необходимой для разрыва ворсинки (обозначим ее через F_2'). Для определенности будем считать, что ворсинка может проскальзывать, если хотя бы один ее конец свободен. Из всего количества ворсинок, составляющих нить, часть ворсинок окажутся захваченными только за один конец, и они смогут проскальзывать; остальные ворсинки окажутся захваченными за оба конца, проскальзывание будет невозможным, и придется их разрывать. При длине нити, практически равной длине ворсинок λ , почти все ворсинки смогут скользить; следовательно, для разрыва нити понадобится сила F_2 . При уменьшении длины нити до нуля, наоборот, все ворсинки окажутся захваченными за оба

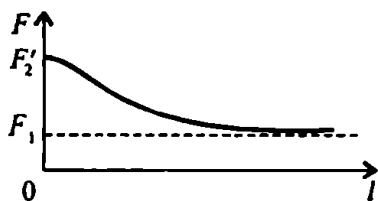


Рис. 4

конца, так что придется приложить силу F_2' . Примерный график зависимости средней силы, необходимой для разрыва нити с длиной порядка длины ворсинки, изображен на рисунке 3.

Совместив графики, приведенные на рисунках 2 и 3, получим результирующую теоретическую кривую зависимости прочности нити от ее длины (рис.4).

Хотя предложенную упрощенную модель и нельзя считать идеальной, она дает хорошее согласование с экспериментом.

УДИВИТЕЛЬНАЯ ЖИДКОСТЬ

И. Медков

В этой статье будет рассказано о некоторых свойствах необычного вещества — ферромагнитной жидкости — и о простых экспериментах с ней.

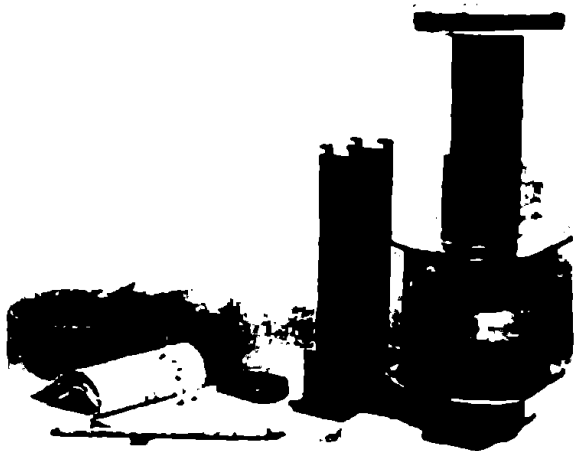
Если с твердыми магнитами человечество знакомо с древнейших времен, то ферромагнитные жидкости, т. е. коллоидные растворы твердых ферромагнетиков, были получены лишь в 60-х годах нашего века. Сейчас эти новые вещества уже достаточно изучены и даже находят некоторое практическое применение.

Как приготовить ферромагнитную жидкость

Прежде всего вам понадобятся касторовое масло (его можно купить в аптеке) и гидрат окиси железа $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (он есть в школьном кабинете химии).

В фарфоровую ступку налейте 10 — 15 г масла и смешайте его с измельченным ферромагнетиком до образования жидкости, похожей на густую сметану. Приготовленную смесь растирайте в ступке в течение 10 — 15 минут.

То, что у вас получилось, не есть настоящий коллоидный раствор, так как частицы неоднородны и их размеры гораздо больше, чем



Опубликовано в «Кванте» №1 за 1984 год. (Тогда автор этой учился в 10 классе 204 московской школы.)

$10^{-7} - 10^{-9}$ м. (Для получения действительно коллоидных растворов необходимы сложные аппараты, например вибромельница для измельчения частиц и центрифуга для последующего разделения их по размерам.) Однако для изучения характерных свойств ферромагнитных жидкостей данная смесь вполне подойдет.

В наших опытах в качестве источника магнитного поля мы использовали школьный демонстрационный электромагнит с обмоткой из 2400 витков. Питался он от сети переменного тока с напряжением 220 В через диодный мост (годятся любые диоды с максимальным током больше 0,5 А). Самое важное – выбор магнитопровода (сердечника электромагнита). Чтобы получить достаточно однородное магнитное поле, площадь сечения магнитопровода должна быть не меньше $8 - 10 \text{ см}^2$. Его можно изготовить самим, набрав из тонких, хорошо изолированных друг от друга пластин, или можно воспользоваться съемным сердечником школьного демонстрационного трансформатора.

Приготовив ферромагнитную жидкость и собрав электромагнит, можете приступить к экспериментам.

Опыты и наблюдения

1. Поместите 30 – 40 г жидкости в мелкую чашку (обязательно из немагнитного материала!), поставьте чашку на торец магнитопровода и включите поле.



Рис. 1

Вы будете наблюдать поднятие жидкости в центре (в наших опытах оно составляло около 5 мм). Если смесь недостаточно хорошо перемешана или слишком велико содержание ферромагнитного порошка, получится «еж» – такой, как на рисунке 1.

2. Тщательно перемешайте жидкость после предыдущего опыта. Если у вас получился «еж», приготовьте новую порцию смеси, с большим содержанием масла. Снова поставьте чашку на торец магнитопровода, возьмите палочку из немагнитного материала и при включенном магнитном поле нарисуйте ею какой-нибудь узор на поверхности жидкости (рис. 2, а). Подождите несколько секунд и выключите поле. Поверх-

50

ность жидкости разгладится, и на ней будет еле виден контур нанесенного вами рисунка (рис.2,б). Затем повторно включите поле – рисунок появится снова (рис.2,в). Опыт можно проделать несколько раз, включая и выключая магнитное поле.

На рисунке 2 изображены фотографии, полученные нами во время опыта. Одно и то же изображение нам удавалось «восстанавливать» 5–6 раз, при этом четкость рисунка практически не уменьшалась (хотя интервалы между включениями поля достигали 20 и более минут).

3. Для этого опыта вам понадобится очень сильное магнитное поле. Можно воспользоваться тем же электромагнитом, но на торец магнитопровода поставить конус – возле острия конуса магнитное поле будет наиболее сильным. Если капнуть на острие каплю жидкости и затем включить поле, жидкость мгновенно изменит цвет, став оранжевой или ярко-красной (в зависимости от ее состава).

Эксперименты закончены. Теперь подумаем, почему и как происходят эти удивительные явления.

В первом опыте мы видели, что жидкость поднимается в центре сечения магнитопровода. Этот эффект известен под названием магнитоэлектрического и заключается в увеличении давления жидкости в области сильного поля.

Способность «запоминать» свойственна многим магнитным материалам. Так и магнитная жидкость, однажды приняв форму,

а)



б)



в)



Рис. 2

при которой ее энергия минимальна, снова «вспоминает» свое состояние при включении поля.

Другие опыты и наблюдения постарайтесь объяснить сами.

Возможное практическое применение

Придумано много остроумных конструкций, использующих ферромагнитные жидкости. Вот некоторые из них.

В высококачественных громкоговорителях в зазор между катушкой электромагнита и его сердечником можно залить магнитную жидкость. Это позволит значительно улучшить характеристики динамиков.

На основе этой удивительной жидкости можно создать специальный насос. Он представляет собой трубку из гибкого материала, помещенную вместе с электромагнитом в камеру с жидкостью. При включении электромагнита жидкость пульсирует, возникает деформация эластичной трубки, и находящееся в ней вещество перекачивается в нужном направлении. Это несколько напоминает работу пищевода человека, отсюда и название: перистальтический насос. Такой насос можно использовать, например, для подачи топлива на космических кораблях.

Ферромагнитные жидкости можно применять также в магнитожидкостных уплотнителях подшипников турбин, в качестве теплоносителя в тепловых машинах и т.д.

Заключение

Эксперименты с ферромагнитными жидкостями очень интересны. Если вам понравились наши опыты, вы сможете продолжить их или придумать новые. Так, в популярных книгах по химии можно найти рецепт приготовления пирофорного железа. Это настолько мелкий порошок, что он самопроизвольно загорается на воздухе (поэтому будьте с ним осторожны!). Ферромагнитные жидкости, содержащие пирофорное железо, обладают очень интересными свойствами.

ЦВЕТА РАССЕЯННОГО СВЕТА

А.Боровой

Синева неба, белые, постоянно меняющие свои очертания облака, краски восхода и заката всегда вызывали у людей чувство восхищения. Они питали фантазию поэтов и художников и, естественно, привлекали внимание ученых.

«Воздушная синева рождается от телесной плотности освещенного воздуха, находящегося между верхним мраком и землей», — писал еще Леонардо да Винчи. Около ста лет назад, в 1869 году, известный английский физик Дж.Тиндаль впервые поставил опыты, в которых наблюдал синий оттенок рассеянного света. Однако понадобилось еще немало усилий и труда таких ученых, как Рэлей, Смолуховский, Мандельштам, Эйнштейн, чтобы окончательно объяснить краски дневного и вечернего неба рассеянием света.

Знакомство с этим явлением мы начнем с простых модельных опытов, затем попытаемся качественно объяснить полученные результаты и от них «перекинуть мостик» к цвету неба.

Для опытов необходим прямоугольный сосуд с прозрачными стенками, например аквариум. Его длина должна составлять не менее 30 см. Кроме сосуда понадобится источник света, дающий слабо расходящийся пучок лучей. Можно воспользоваться диапроектором, поставив на место слайда кусочек черной бумаги с круглым отверстием диаметром 2—3 мм в центре, или приспособить для этой цели достаточно сильный электрический фонарь (или воспользоваться лазерной указкой — *прим. ред.*).

Опыты надо проводить в затемненной комнате.

Налейте в сосуд воду и направьте сквозь нее световой пучок вдоль длинной стороны сосуда. А теперь посмотрите на него сбоку. Чем чище вода, чем меньше в ней пузырьков, пылинок и других посторонних включений, тем менее заметен пучок. Он лишь слегка подсвечивает сосуд на границах воздух — стекло и

Опубликовано в «Кванте» №3 за 1984 год.

стекло – вода. Однако стоит только нарушить однородность жидкости, например начать перемешивать воду или нагревать ее (придумайте сами, как можно это осуществить), и в местах неоднородностей рассеяние света, отклонение его по различным направлениям станет значительно сильнее. (Здесь можно вспомнить и всем известный факт: солнечный луч, проникший через щель в занавеске, виден нам сбоку по светящимся в нем пылинкам.)

Из этого опыта можно сделать вывод, что свет, распространяясь в однородной жидкости, не рассеивается (или рассеивается очень слабо).

Теперь будем добавлять в воду по каплям молоко и хорошенько размешивать жидкость. Частички жира, содержащегося в молоке, не растворяются в воде, а находятся там во взвешенном состоянии. Уже после добавления первых капель рассеянный свет станет виден гораздо лучше. Обратите внимание – он имеет голубоватый оттенок. (Иногда наблюдается такой же эффект, если в легком тумане вы смотрите сбоку на свет фар проезжающей машины.)

Постепенно увеличивая концентрацию молока, мы увидим, что голубоватый цвет рассеянного света сменился в конце пути на желтоватый или даже красноватый. Окрашенным в такие же цвета будет и свет, прошедший через сосуд.

При большом количестве молока рассеянный свет становится белым.

Можно сделать еще несколько выводов: нарушение однородности жидкости добавлением в нее весьма малых частиц приводит к увеличению рассеяния, при этом синий свет рассеивается сильнее, а красный слабее, так что белый свет, прошедший сквозь такую жидкость, «обогащается» красным цветом; если же частиц очень много и они образуют целые скопления, рассеянный свет оказывается белым.

Качественное объяснение опытов можно понять, если опираться на такие факты:

а) Любой электрический заряд, движущийся ускоренно (например, колеблющийся), излучает электромагнитные волны. Излучение тем более интенсивное, чем больше ускорение (частота колебаний).

б) Электромагнитная волна в каждой точке среды, куда она дошла, создает переменное электромагнитное поле.

в) Волны от зарядов, колеблющихся с одной частотой, складываются таким образом, что в одних точках они могут усиливать, а в других гасить друг друга.

г) Свет представляет собой электромагнитные волны. Видимый белый свет – набор электромагнитных волн, в котором самая малая длина волны у фиолетового и синего цвета ($\lambda = (4 - 5) \cdot 10^{-7} \text{ м}$), а самая большая – у желтого и красного ($\lambda = (6 - 7) \cdot 10^{-7} \text{ м}$).

Когда свет проходит через однородную среду, его переменное поле возбуждает колебания электронов в атомах, и они начинают сами излучать электромагнитные волны той же частоты. Но, как показывает расчет, их излучение гасит друг друга во всех направлениях, кроме направления распространения света. При идеальной однородности среды мы вовсе не увидели бы рассеянного света. Другое дело, когда среда неоднородна. Наличие неоднородностей создает совсем иные условия для сложения вторичных волн, и возникает рассеяние света по различным направлениям.

Если неоднородности невелики по размерам (много меньше длины волны падающего света), рассеяние света описывается законом, открытым в 1871 году английским физиком Рэлеем: интенсивность рассеянного света прямо пропорциональна четвертой степени его частоты (обратно пропорциональна четвертой степени его длины волны). Следовательно, голубой свет рассеивается гораздо сильнее красного. Вот почему в наших опытах, наблюдая сбоку, мы видели голубую окраску рассеянного света, а цвет прошедшего через жидкость света казался красноватым. Тиндаль так описывал свое впечатление от увиденного им эффекта: «Мы наблюдали синий цвет, который соперничал с цветом голубого и чистого неба Италии, если не превосходил его».

В повседневной жизни мы часто сталкиваемся с такими случаями, когда в однородной среде (жидкости или газе) присутствуют весьма малые (по сравнению с длиной волны видимого света) посторонние частицы. Это дым, туман или пыль в воздухе, мелкие частицы твердого вещества в воде, различные эмульсии и т.п. Все они могут вызвать рассеяние света.

Что же, голубой цвет весеннего неба или краски солнечного заката связаны с пылью и дымом в воздухе? Так вначале и думали. Но этому противоречило, например, то, что высоко в горах, где нет ни пыли, ни дыма, окраска неба может быть ярче, чем в запыленном городе.

Объяснение состоит в другом. За счет хаотичного движения молекул воздуха возможно появление в нем существенных неоднородностей плотности. Эти неоднородности приводят к рассеянию света и появлению синего или голубого цвета дневного

неба. А солнечные лучи, которым на рассвете или закате приходится пронизывать гораздо большую, чем днем, толщу воздуха, приобретают красный или желтый оттенки.

Конечно, это не исключает влияния пыли, дыма или тумана на окраску неба. По этому поводу можно привести любопытный эпизод, описанный К. Паустовским в книге «Золотая роза»:

«Французский художник Моне приехал в Лондон и написал Вестминстерское аббатство. Работал Моне в обыкновенный лондонский туманный день. На картине Моне готические очертания аббатства едва выступают из тумана. Написана картина виртуозно.

Когда картина была выставлена, она произвела смятение среди лондонцев. Они были поражены, что туман у Моне был окрашен в багровый цвет, тогда как всем известно, что цвет тумана серый.

Дерзость Моне вызвала сначала возмущение. Но возмущавшиеся, выйдя на лондонские улицы, взгляделись в туман и впервые заметили, что он действительно багровый».

Рассеяние света на частицах, размеры которых сравнимы с длиной волны его видимой части, могут приводить к совершенно необычной окраске, поскольку закон Рэлея здесь перестает действовать, и красный свет рассеивается даже более интенсивно, чем синий. Именно поэтому удивительный цвет неба наблюдается иногда при извержениях вулканов, когда мельчайшая пыль висит в воздухе, при песчаных бурях или крупных лесных пожарах. Этим же объясняется явление, получившее название «синей луны»: частицы, взвешенные в воздухе, сильнее рассеивают красные лучи, и до нас доходит только синий свет. В облаке же размеры капель настолько велики, что свет отражается от их поверхности и не меняет своего спектра, т.е. остается белым.

СВЯЗАННЫЕ МАЯТНИКИ

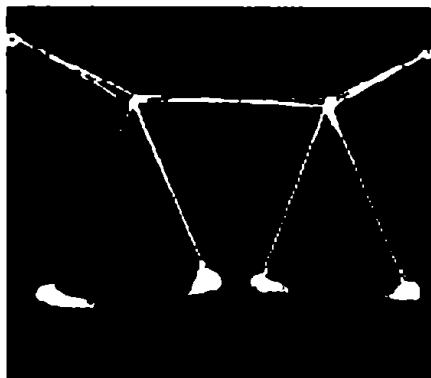
Е.Бутиков

Закономерности колебаний сложных систем – таких, как связанные маятники, – можно изучить на опыте с помощью простейших средств. Все, что вам потребуется для того, чтобы воспроизвести описываемые здесь опыты, это два одинаковых небольших грузика (например, массивные гайки), два штатива, которые с успехом можно заменить спинками стульев, прочные нитки, секундомер или часы с секундной стрелкой.

Прикрепим грузики к нитям одинаковой длины 50 – 60 см, а нити привяжем к поперечной нити длиной около 1 м, расположив их симметрично на расстоянии 40 – 50 см друг от друга. Концы поперечной нити закрепим в штативах или привяжем к спинкам стульев. В результате получим систему из двух маятников – это и есть связанные маятники. Желательно добиться возможно более совершенной симметрии системы. Нужно позаботиться также и о том, чтобы можно было изменять расстояние между штативами, регулируя тем самым провисание поперечной нити.

Несмотря на простоту, это устройство дает возможность провести много интересных наблюдений. Ограничимся изучением лишь свободных (или собственных) колебаний системы в случае, когда маятники качаются перпендикулярно к плоскости их равновесия.

Удерживая один из маятников в положении равновесия, другой отклоним на небольшой угол в поперечном направлении, затем отпустим маятники одновременно. Будем внимательно следить за их дальнейшим поведением. Мы увидим, что амплитуда коле-



Опубликовано в «Кванте» №5 за 1984 год.

баний первоначально отклоненного маятника постепенно уменьшается, но одновременно с этим второй маятник раскачивается все сильнее и сильнее. В какой-то момент маятники будут колебаться с одинаковыми амплитудами. Но через некоторое время первый маятник вообще остановится, замрет в положении равновесия, а второй раскачается настолько, что его амплитуда будет такой же, как в начальный момент у первого маятника. Колебания как бы полностью перейдут от одного маятника к другому.

Продолжаем наблюдать дальше. Теперь все процессы происходят в обратной последовательности: амплитуда второго маятника уменьшается, а первый раскачивается, пока не достигнет прежней амплитуды. Затем все повторяется сначала.

Такой тип движения с периодическими «замираниями» колебаний принято называть биениями. Проследите за несколькими циклами биений и постарайтесь определить их период, т.е. время, в течение которого один из маятников совершает полный цикл от одной остановки до другой. (При этом в качестве часов можно использовать сами маятники: подсчитайте, например, сколько полных колебаний совершает маятник за один цикл биения.)

Почему колебания передаются от одного маятника к другому? Понаблюдаем за поперечной нитью, к которой они привязаны. Легко заметить, что при колебаниях маятников она не остается неподвижной: отклоняясь в сторону, один из маятников тянет ее за собой и тем самым приводит в движение точку подвеса второго маятника. Таким образом поперечная нить осуществляет связь маятников друг с другом. Потому маятники и называются связанными.

Интуиция подсказывает, что маятники связаны тем сильнее, чем больше провисает нить. Проверим это на опыте. Уменьшим натяжение нити, несколько сблизив точки ее закрепления, и повторим описанный выше опыт. Мы увидим, что полный цикл передачи колебаний от одного маятника к другому и обратно сокращается. Напротив, при увеличении натяжения нити связь маятников ослабляется, и обмен колебаниями происходит медленнее. Но интересно, что и при заметно ослабленной связи маятники полностью обмениваются энергией. (Конечно, если принять во внимание постепенное затухание колебаний маятников из-за трения, то при очень слабой связи время обмена энергией может стать больше времени затухания колебаний. Колебания возбужденного маятника прекратятся прежде, чем он успеет передать заметную часть своей энергии другому маятнику. В

таких условиях наличие связи маятников становится несущественным, и их можно рассматривать как независимые.)

Задумаемся над тем, почему после того как амплитуды, а значит, и энергии маятников станут одинаковыми, процесс обмена энергией не прекращается, а продолжается до тех пор, пока возбужденный маятник не передаст другому всю свою энергию. Все дело в соотношении фаз: при выравнивании амплитуд колебания раскачиваемого маятника отстают по фазе на четверть периода. В тот момент, когда «активный» маятник достигает максимального отклонения и создает наибольшее натяжение поперечной соединительной нити, «пассивный» маятник (т.е. раскачиваемый) еще только проходит через положение равновесия. Скорость точки его подвеса максимальна, а действующая на нее со стороны поперечной нити сила направлена в ту же сторону, куда движется точка подвеса. Это значит, что здесь сложились наиболее благоприятные условия для продолжения передачи энергии в прежнем направлении.

Мы видели, что при рассмотренном способе возбуждения (начальное отклонение одного из маятников) возникающие колебания не являются гармоническими (хотя при слабой связи их можно считать почти гармоническими с медленно меняющейся амплитудой). А нельзя ли возбудить колебания таким образом, чтобы движение каждого из маятников было чисто гармоническим? Легко сообразить, что для колебаний, перпендикулярных к равновесной плоскости, существует два типа таких движений.

Во-первых, можно отклонить оба маятника на один и тот же небольшой угол в одном направлении и одновременно осторожно отпустить их без толчка. Тогда вся система будет качаться как единое целое. Попробуйте возбудить такие колебания и измерьте их частоту ω_1 . Так как маятники колеблются в одинаковых фазах, зависимость смещения от времени для каждого из них выражается одной и той же гармонической функцией:

$$x_1(t) = x_2(t) = x_m \cos \omega_1 t, \quad (1)$$

где амплитуда x_m равна начальному отклонению маятников из положения равновесия.

Во-вторых, можно отвести оба маятника на одинаковые углы в противоположные стороны и одновременно отпустить. Маятники и в этом случае будут совершать гармонические колебания с одинаковой амплитудой и одной и той же частотой ω_2 (эта частота несколько больше, чем ω_1), но в противоположных фазах. Поэтому зависимости смещения от времени

имеют вид

$$x_1(t) = x_m \cos \omega_2 t, \quad x_2(t) = -x_m \cos \omega_2 t. \quad (2)$$

Такие движения сложной системы, когда все тела совершают чисто гармонические колебания с одной и той же частотой, называются нормальными колебаниями, или модами, системы. Поперечным колебаниям связанных маятников соответствуют две рассмотренные выше моды с частотами ω_1 и ω_2 . Каждая мода характеризуется не только собственной частотой, но и определенным взаимным расположением (конфигурацией) маятников при колебаниях.

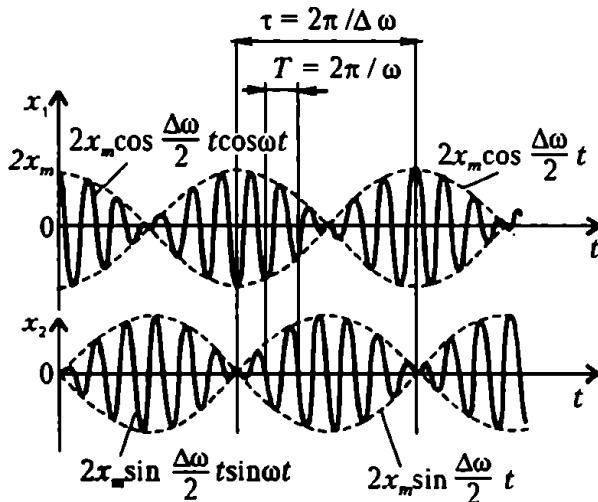
Какое отношение имеют моды к изученным ранее биениям? Вспомним начальные условия, при которых возбуждается каждая из них: для первой маятники нужно отклонить в одну сторону, для второй – в противоположные. Если мы захотим возбудить обе моды одновременно, то как раз и получим начальные условия, соответствующие возбуждению биений: один маятник отклонен, второй находится в положении равновесия. Таким образом, мы приходим к выводу, что биения получаются в результате суперпозиции нормальных колебаний с частотами ω_1 и ω_2 и одинаковыми амплитудами.

Смещение каждого маятника в любой момент времени t мы получим, сложив соответствующие выражения из формул (1) и (2) и воспользовавшись известными тригонометрическими тождествами:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_m (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) = 2x_m \cos \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t \cos \frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t, \\ x_2(t) &= x_m (\cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t) = 2x_m \sin \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t \sin \frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t. \end{aligned} \quad (3)$$

Если разность частот нормальных колебаний $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ мала по сравнению со средней частотой $\omega = (\omega_2 + \omega_1)/2$, то в правых частях формул (3) первая тригонометрическая функция изменяется медленно по сравнению со второй. Это и значит, что $x_1(t)$ и $x_2(t)$ описывают почти гармонические колебания с частотой ω и медленно пульсирующими амплитудами. Соответствующие графики приведены на рисунке. Мы видим, что они правильно описывают то, что наблюдалось в первом опыте.

О представлении сложного колебания в виде суммы гармонических колебаний говорят как о разложении в спектр. Спектр любого поперечного колебания маятников изучаемой системы, в том числе и биений, состоит только из двух компонентов с



Так выглядят графики биений двух связанных маятников. В начальный момент первый маятник отклонен на небольшой угол в направлении, перпендикулярном плоскости равновесия системы, а второй маятник находится в положении равновесия

частотами ω_1 и ω_2 , так как ими исчерпывается весь набор поперечных нормальных колебаний. Все многообразие возможных свободных колебаний, возникающих при разных начальных условиях, обусловлено различными соотношениями амплитуд и фаз этих спектральных компонентов. Попробуйте задать иные, чем раньше, начальные условия (например, неодинаковые начальные отклонения) и понаблюдайте за возникающими колебаниями.

Со связанными маятниками можно проделать еще много интересных опытов, если не ограничиваться только поперечными движениями. В этой системе есть еще три моды, соответствующие колебаниям маятников в плоскости, образуемой нитями при равновесии. Попробуйте возбудить эти моды и понаблюдайте за ними.

ФОНТАНЫ В ПАРКАХ И ДОМА

С.Гаврилов

Предок современного фонтана появился очень давно – когда первобытный человек облицовал родник камнями. Вода полилась струйкой, и стало удобно наполнять ею глиняную и деревянную посуду. Спустя тысячелетия каменная облицовка приобрела эстетическое значение. Появились такие произведения искусства, как фонтаны Древней Греции, Рима, а затем Версаля и Петергофа. Но вплоть до конца прошлого столетия сохранилось и утилитарное назначение фонтанов – население брало из них воду. Это и понятно: само слово «фонтан» происходит от латинского *fons* – источник.

Большое внимание внешнему виду фонтанов уделяли русские архитекторы. С XVIII века фонтаны в России – неотъемлемая



часть дворцово-парковой архитектуры. Самый яркий пример этому – фонтаны Петергофа, загородной резиденции русских царей, основанной Петром I в 1709 году. В его строительстве принимали участие такие прославленные архитекторы, как Растрелли, Кваренги и др. Гидротехническими работами руководил инженер Туволков. Вот что писал русский художник Александр Бенуа: «Фонтаны в Петергофе не придаток, а главное. Они являются символическим выражением водяного царства, тучей брызг того моря, которое плещется у берегов Петергофа». При-

Опубликовано в «Кванте» №6 за 1984 год.

мечательно, что из-за благоприятного расположения территории дворца для питания фонтанов не пришлось строить никаких водоподъемных сооружений. Вода собиралась в окрестных реках и по разветвленному трубопроводу поступала к ансамблю. А необходимое для действия фонтанов давление создавалось за счет естественного перепада уровней.

Не меньший интерес к фонтанам проявляли и западноевропейские архитекторы. Со времен эпохи Возрождения в Европе было построено много красивейших фонтанов, которые до сих пор производят неизгладимое впечатление. Но самый выдающийся памятник садово-парковой архитектуры с использованием фонтанов – это Версаль, резиденция французских королей, построенная во второй половине XVII века по проекту архитектора Андре Ленотра. Версаль расположен значительно выше долины, по которой катит свои воды Сена. Поэтому, чтобы били фонтаны, пришлось строить мощную, по тем временам, насосную станцию. Любопытно, что насосы приводились в движение водяным колесом, вращающимся за счет течения реки.

Мы привыкли к тому, что место фонтана – на площади или в саду. Но можно устроить фонтаны (конечно, гораздо меньших размеров) и в домашних условиях. Предлагаем вашему вниманию несколько наиболее интересных и легко осуществимых устройств.

Создание одного из самых остроумных по конструкции фонтанов приписывается древнегреческому ученому Герону Александрийскому (I век нашей эры). Этот фонтан состоит из трех сосудов (рис.1) – одного открытого плоского (А) и двух закрытых шарообразных (Б и В), соединенных между собой тонкими трубками. Достаточно наполнить водой сосуд Б и налить немного воды в сосуд А, как фонтан начнет действовать. Вода, переливаясь из сосуда А в сосуд В, вытесняет оттуда воздух в сосуд Б. Там создается избыточное, по сравнению с атмосферным, давление, которое и заставляет воду бить фонтаном. (Очевидно, что это избыточное давление равно разности давлений, создаваемых столбами воды АВ и АБ: $p_{изб} = \rho g H_{AB} - \rho g H_{АБ} = \rho g (H_{AB} - H_{АБ})$.) Когда сосуд В наполнится водой, фонтан перестанет работать. Но достаточно его пе-

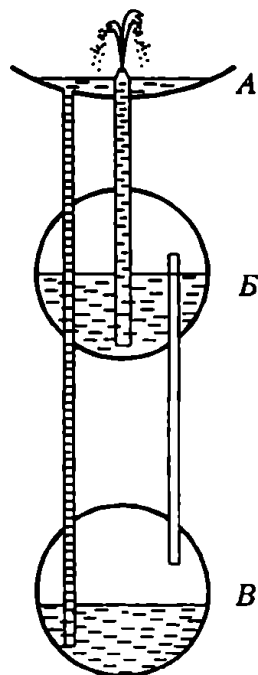


Рис. 1

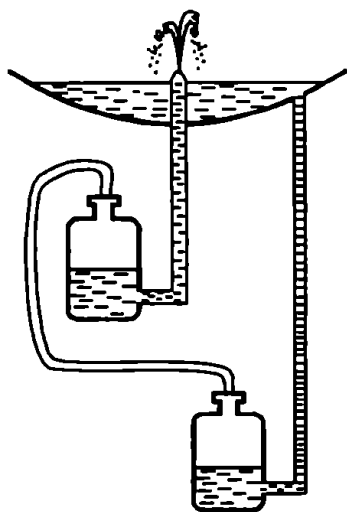


Рис. 2

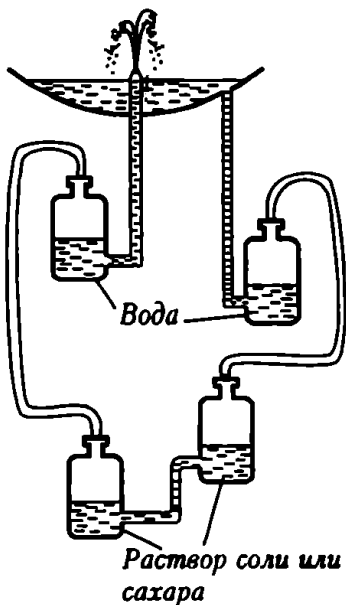


Рис. 3

ревернуть, чтобы вода из *В* перелилась в *Б*, и фонтан снова готов к работе.

Я.И.Перельман в книге «Занимательная физика» приводит упрощенную конструкцию фонтана Герона, которую любой может повторить в домашних условиях. Автором этой модернизации был школьный учитель из Италии. Не имея возможности воспроизвести конструкцию старинного фонтана в точности, он употребил вместо шаров аптечные склянки с двумя отверстиями, а вместо стеклянных трубок – резиновые (рис.2). Не обязательна и специально изготовленная верхняя ванночка. Ее вполне может заменить обычная миска, к которой соответствующим образом крепятся резиновые трубки. Такая конструкция интересна еще и тем, что, меняя относительное расположение склянок, можно изменять высоту струи фонтана.

Этого же можно добиться, если в разрез трубки, передающей давление воздуха из сосуда *В* в сосуд *Б*, поместить своеобразный «гидроусилитель давления» – склянки с жидкостью большой плотности (рис.3). Наибольшего эффекта можно было бы добиться, используя ртуть, которая тяжелее воды в 13,6 раза. Но работать с ней опасно, поэтому лучше воспользоваться раствором поваренной соли или сахара в воде. Сахар несколько предпочтительнее, так как он, в отличие от соли, не дает насыщенного раствора и позволяет получить «сироп» с плотностью, в 1,5 раза

превышающей плотность воды.

А можно устроить фонтан, который будет приводиться в действие паром. Подобные конструкции использовались на практике,

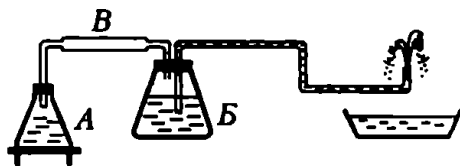


Рис. 4

когда человечество еще не знало насосов с электрическим приводом. Пример схемы «парового» фонтана приведен на рисунке 4. При нагревании воды в колбе А образуется пар, который создает избыточное давление в сосуде Б, вытесняя из него воду.

Такой фонтан воспроизвести нетрудно. Нужно помнить только, что колба А должна быть из термостойкого стекла (можно использовать металлический сосуд), а соединения — достаточно герметичными. Пробки для колб легко изготовить из плотной резины, а отверстия в них — прорезать с помощью тонкостенной металлической трубочки с заостренными краями.

Этот фонтан может действовать также, если вместо пара использовать сжатый воздух. Для этого колбу нужно заменить предварительно накачанной камерой от волейбольного мяча или любой другой подходящей резиновой емкостью. По мере уменьшения давления в камере фонтан, естественно, будет ослабевать. Чтобы это происходило не так быстро, на камеру можно поставить сосуд, в который собирается вытекающая из фонтана вода. Наполняясь водой, сосуд будет давить на камеру с большей силой, что, в некоторой степени, замедлит падение давления в камере.

Фонтан возможно привести в действие и с помощью газов, выделяющихся при некоторых химических реакциях. Например, используя реакцию нейтрализации уксусной кислоты пищевой содой, при которой выделяется достаточное количество углекислого газа.

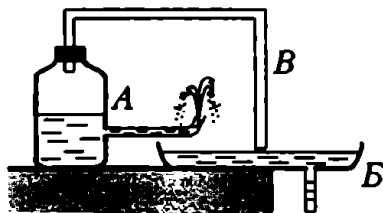


Рис. 5

Фонтан, изображенный на рисунке 5, интересен тем, что он сам периодически прекращает свое действие, а через определенное время возобновляет его. Пока нижний конец трубки В открыт, пространство над жидкостью в сосуде А соединено с атмосферой, давление в нем равно атмосферному и фонтан функционирует. Когда уровень воды в сосуде Б достигнет трубки В, воздух перестанет поступать в сосуд А, и по мере расхода воды в нем будет создаваться разрежение. По истечении некоторого

времени фонтан иссякнет. Если же в сосуде *Б* сделать небольшой сток, часть воды из сосуда выльется, отверстие в трубке *В* откроется, и фонтан снова заработает. Для того чтобы фонтан действовал периодически, поступление воды в сосуд *Б* должно быть больше расхода. Тогда при работающем фонтане уровень воды будет подниматься, а после остановки фонтана – опускаться, и, когда конец трубки *В* окажется в воздухе, фонтан снова заработает.

В заключение хочется напомнить, что многие современные большие фонтаны в темное время суток украшают самой разнообразной подсветкой. Не надо забывать о таких возможностях, создавая и мини-фонтаны в домашних условиях. Используя обычные осветительные приборы и разноцветные светофильтры и призвав на помощь немного фантазии, можно домашний фонтан превратить в красочное зрелище.

ПОЧЕМУ «ПОЕТ» ВОДОПРОВОД?

Е.Пальчиков

Согласитесь, что «пение» водопроводных труб, особенно в поздний час, не доставляет особого удовольствия. Попробуем избавиться от неприятных звуков или хотя бы понять причину их возникновения, вы открываете водопроводный кран. Часто это ни к чему не приводит. Но иногда бывает и так: достаточно открыть кран, который до этого был закрыт, и гудение либо переходит на другую ноту, либо пропадает вовсе. Значит, причиной всему водопроводный кран? Оказывается, да. Точнее – неисправный кран.

Физику-экспериментатору «поющий» водопровод может послужить хорошим объектом для исследований, а избавление от «пения» – неплохой лабораторной работой с полезным выходом для окружающих.

Как известно, источником звука может быть любое тело, колеблющееся со звуковой частотой. Рассмотрим, где и каким образом возникают колебания в системе водопровод – кран.

На рисунке 1 изображена одна из возможных конструкций водопроводного крана. В нем заслонка, состоящая из металлической шайбы и резиновой прокладки, прижимается винтом к бортику, ограничивающему круглое отверстие, через которое вода поступает к крану. Что произойдет, если кран слегка приоткрыть? Очевидно, что самое узкое место, через которое проходит вода, это щель между краями отверстия и нижней стороной

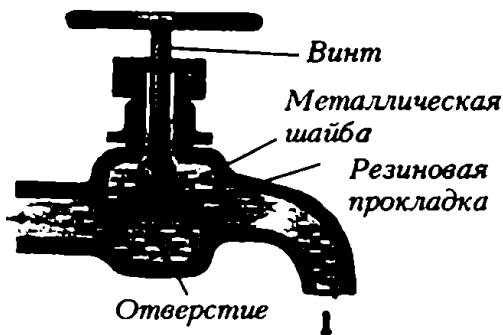


Рис. 1

Опубликовано в «Кванте» №7 за 1984 год.

заслонки. Так как объем воды, проходящий в единицу времени через любое поперечное сечение водопровода, остается постоянным, в самом узком месте скорость движения воды будет самой большой. С верхней стороны заслонки скорость воды существенно меньше, чем с нижней. При изменении скорости жидкости, движущейся по водопроводу, меняется и давление. В соответствии с законом Бернулли, там, где больше скорость, меньше давление и наоборот.

При некоторых скоростях расхода воды и «благоприятных» размерах заслонки, отверстия и щели может оказаться, что сумма сил давления, действующих на заслонку снизу, будет намного меньше сил давления сверху, и заслонка прижмется к отверстию. Очевидно, что долго такая ситуация продолжаться не может. Как только заслонка перекроет воду, скорость в зазоре упадет, давление снизу повысится, и заслонку отбросит от отверстия вверх. После чего процесс повторится сначала.

Колебания заслонки, которые мы рассмотрели, могут происходить в довольно широком интервале частот. Однако из практики известно, что каждый водопровод «поет», как правило, на одной ноте. В крайнем случае на двух-трех. Почему?

Оказывается, здесь главную роль играют трубы водопровода, заполненные водой. Под влиянием заслонки в них тоже возникают колебания, причем сильнее всего столб воды откликается на те частоты, на которых может колебаться он сам. Это – конкретное проявление известного явления резонанса, поэтому неслучайно, что соответствующий участок водопровода называют резонатором. Таким образом, из всех возможных частот колебаний заслонки в кране «выбираются» только те, на которых может колебаться столб воды в прилегающих к крану участках трубопровода.

При этом колебания столба воды помогают колебаниям заслонки, управляют ими. Заслонка же отбирает часть энергии у вытекающей из крана воды и отдает эту энергию колеблющемуся в трубах столбу воды. Другими словами, колебания заслонки вызывают колебания воды, а последние, в свою очередь, заставляют колебаться заслонку. Для того чтобы колебания не ослабевали, заслонка должна колебаться в такт с колебаниями прилегающего к ней столба воды.

Заметим, что рассмотренная ситуация наблюдается реально только тогда, когда заслонка расхлябана и имеет возможность свободно двигаться в некоторых пределах вдоль оси винта, а резиновая прокладка сильно деформирована и повторяет очертания бортика вокруг отверстия.

И еще. Все происходящее в реальном трубопроводе, конечно, намного сложнее того, что было описано выше. Тем не менее понимание физической сущности процессов, происходящих в «поющем» водопроводе, может оказать реальную практическую помощь – найти неисправные краны. Например, если при открывании вашего, ранее закрытого крана, «пение» изменилось или прекратилось, то это означает, что участок трубы с вашим краном входит в резонатор. Изменение «пения» обычно происходит за счет изменения размеров, формы резонатора (или потерь в нем). Прекращение (срыв) колебаний может быть следствием изменения давления в трубопроводе, увеличения потерь в резонаторе или уменьшения энергии, поступающей от крана.

А если после открывания вашего крана «пение» не изменилось, говорит ли это о том, что ваш участок трубы не резонирует? Подумайте над этим вопросом самостоятельно.

Во всяком случае, радикальное средство избавления от «пения» состоит в том, чтобы отыскать и починить кран (или краны), в котором вышла из строя прокладка. Достаточно сменить резиновую прокладку, а при необходимости и уменьшить возможность передвижения заслонки – и колебания пропадут. Как же это сделать практически?

Для этого нужно сначала перекрыть водопровод аварийным краном (который обычно расположен в ванной комнате или в кухне под раковиной), затем ключом или плоскогубцами открыть корпус ремонтируемого крана (ни в коем случае не аварийного!). Чтобы не нарушить никелировку, откручивать крышку корпуса нужно осторожно, подложив под плоскогубцы несколько слоев бумаги или ткани. После этого из резины подходящей толщины (обычно от 2 до 4 мм) вырезается новая прокладка и ставится на место неисправной (или отсутствующей вовсе). В большинстве бытовых кранов прокладка должна лежать в углублении металлической шайбы и держаться за счет того, что ее диаметр чуть больше диаметра углубления. В некоторых кранах в центре прокладки делается отверстие, и она крепится к шайбе гайкой. Отремонтированный кран собирают в обратном порядке и потихоньку открывают аварийный кран.

В заключение предлагаем вам провести опыт, моделирующий поведение заслонки в водопроводном кране.

Через полутораметровый резиновый шланг подсоедините к крану мундштук с размерами, изображенными на рисунке 2. Откройте воду, возьмите в руку трехкопеечную монету (сейчас подойдет рублевая монета – прим. ред.) и постарайтесь ее

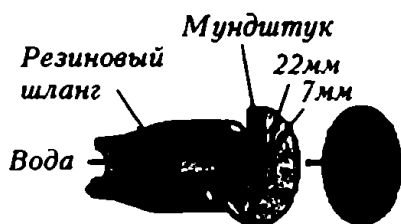


Рис. 2

«посадить» на конец мундштука (гербом к мундштуку). После некоторой тренировки можно добиться того, чтобы монета устойчиво держалась при довольно большом интервале скоростей расхода воды и при любом положении мундштука. Никаких колебаний при этом не наблюдается,

а вся конструкция напоминает разбрызгиватель для поливки огородов.

Интересно, что диск того же размера, что монета, но с гладкой поверхностью, на мундштуке не удерживается. Зато если прижать его к мундштуку пальцем, появляются колебания, причем при увеличении силы нажима частота колебаний возрастает. Таким образом можно руками потрогать модель заслонки водопроводного крана и убедиться, что колебания действительно возможны.

Для последнего опыта не обязательно выдерживать указанные размеры мундштука и «заслонки». Важно только, чтобы их поверхности были плоскими и гладкими.

Попробуйте самостоятельно придумать и другие опыты, моделирующие процессы, происходящие в гудящем («поющем») водопроводе.

ПУЗЫРЬКИ В ЖИДКОСТИ

А.Боровой

Как устроена пузырьковая камера

В начале пятидесятых годов нынешнего столетия молодой сотрудник Мичиганского университета (США) Дональд Глейзер придумал новый тип прибора, регистрирующего элементарные частицы. Он получил название пузырьковой камеры.

На рисунке 1 изображена современная пузырьковая камера. Это – сооружение, занимающее большой зал высотой в несколько этажей, оснащенное сложной техникой и управляемое быстродействующими электронно-вычислительными машинами. Многие из установок имеют даже собственные имена: «Людмила», «Мирабель», «Гаргамель» и т.п.

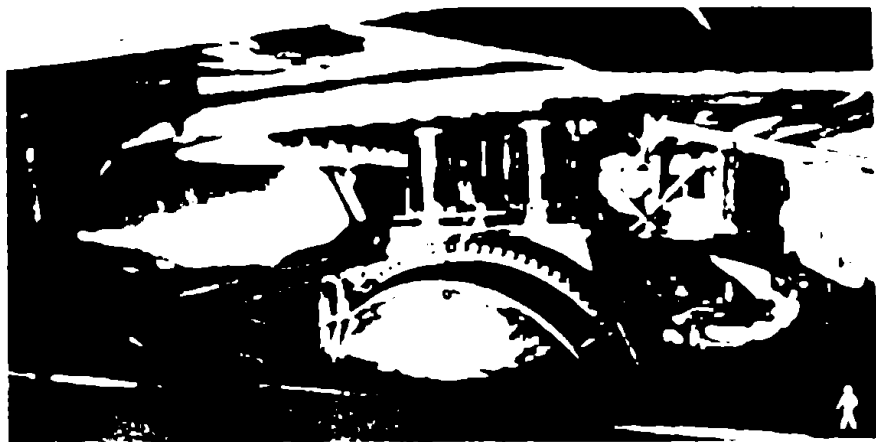


Рис. 1. Пузырьковая водородная камера «Мирабель», используемая для исследований в Институте физики высоких энергий

Однако первые модели камер, изготовленные Глейзером, никак нельзя было назвать впечатляющими. Их главная часть

Опубликовано в «Кванте» №2 за 1985 год.

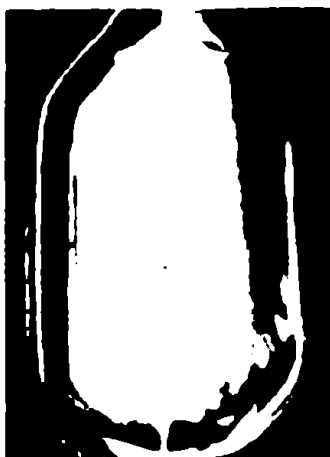


Рис.2. Трек заряженной элементарной частицы, полученный в первой пузырьковой камере Глейзера

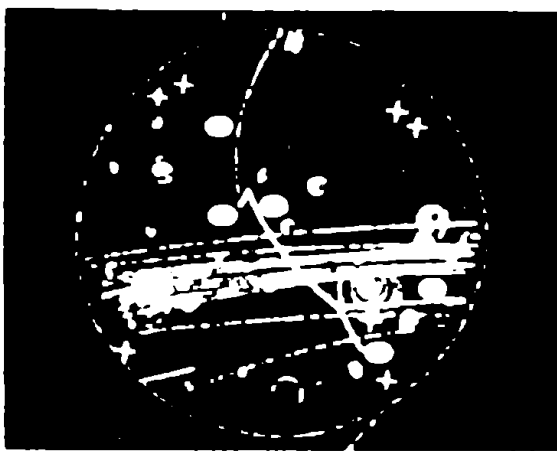


Рис.3. Фотография процессов взаимодействия и превращения элементарных частиц в жидководородной пузырьковой камере

представляла собой стеклянную ампулу с эфиром объемом несколько кубических сантиметров (рис.2). Жидкость была нагрета и находилась под давлением около 20 атм. Специальное устройство (тоже несложное) позволяло быстро сбросить давление, но при этом эфир закипал не сразу. Если во время такого «ожидания» через жидкость пролетала заряженная частица, оставляя за собой след из ионов, то вдоль следа появлялись пузырьки пара. Сфотографировав след, можно было снова повысить давление, пузырьки исчезали (раздавливались), и прибор был опять готов к работе.

Так пузырьки в жидкости оказались необыкновенно полезными для физики элементарных частиц. На рисунке 3 представлен один из снимков, сделанных с помощью пузырьковой камеры.

Почему же пузырьки появлялись именно на пути частицы?

Сначала вспомним, что такое кипение

Кипение – это образование по всему объему жидкости пузырьков пара, которые растут и всплывают на поверхность. Очевидно, что для этого давление пара в пузырьках должно быть больше, чем давление в жидкости (иначе последняя их раздавит). Все знают, что при нормальном атмосферном давлении вода кипит при 100 °С. Именно при такой температуре давление насыщенного пара становится достаточным, и жидкость закипает. Но всегда ли закипает?



Рис.4. Так, по-разному, происходит процесс кипения воды в пробирке с дистиллированной водой и в пробирке с водопроводной водой

Возьмем две пробирки. Одну из них вымоем особенно тщательно, проследим, чтобы на стенках не было царапин или посторонних частиц, и наполним ее дистиллированной водой (приблизительно 10 см^3). Во вторую пробирку нальем такое же количество, но водопроводной воды и еще бросим кусочек мела. Будем подогревать пробирки в одинаковых условиях и в отсутствие прямого соприкосновения с огнем. Оказывается, вода в них будет кипеть по-разному (рис.4).

В пробирке с водопроводной водой кипение начнется раньше, и процесс этот будет происходить достаточно спокойно и непрерывно. Пузырьки пара образуются, в основном, на кусочке мела. Что касается пробирки с дистиллированной водой, то процесс кипения в ней начнется позже (при большей температуре) и будет происходить неравномерно. В жидкости образуются большие пузыри, их появление и схлопывание сопровождаются громким треском.

В лаборатории удастся очистить сосуд и воду (используется дважды дистиллированная вода) так хорошо, что кипение не наступает вплоть до температуры 140°C . Если в такую воду, ее называют перегретой, бросить крупицу, произойдет взрыв – так быстро образуются пузырьки с паром. Химики хорошо знают это свойство жидкости. Для того чтобы процесс кипения происходил равномерно, без взрыва, в сосуд помещают так называемые «кипелки» – обломки стеклянных или фарфоровых трубок, кусочки мрамора и т.п.

Объяснение описанных выше свойств связано с наличием у жидкости поверхностного натяжения. Поверхность жидкости можно представить себе как растянутую упругую пленку. Плен-

ка стремится сжаться – силы поверхностного натяжения стремятся раздавить образовавшийся пузырек. Дополнительное давление¹, обусловленное этими силами, тем больше, чем меньше радиус пузырька, так что процесс кипения подавляется в самом зародыше. Именно поэтому однородную жидкость удастся перегреть. В то же время любые неоднородности как в самой жидкости, так и связанные с посторонними включениями, облегчают кипение. Такие неоднородности образуются, в частности, на пути заряженной частицы, вот почему он становится местом образования первых пузырьков. Теперь понятно, что важнейшее условие работы камеры Глейзера – это однородность эфира и чистота ампулы.

Несколько любопытных наблюдений над пузырьками в жидкости

Такие наблюдения можно провести, используя газированную воду. Ее поведение иногда аналогично поведению перегретой жидкости. Сразу же возникает вопрос: почему и когда газированная вода может служить моделью перегретой жидкости?

Для опытов понадобится бутылка лимонада, стакан, ложка, сахар и долька шоколада (перечисленные материалы в любом случае гарантируют приятный результат экспериментов). Начнем с того, что быстро откроем бутылку с водой, тогда над горлышком в первый момент появится дымок. С чем это связано?

Теперь нальем воду в стакан и подождем, пока опадет пена и в воде будут подниматься только отдельные пузырьки. Закроем стакан плотно прилегающей крышкой – через некоторое время выделение газа совсем прекратится. Откроем стакан, и пузырьки появятся вновь. Почему?

Бросим в стакан щепотку сахара. «Кипение» воды усилится, и на ее поверхности снова появится пена. Очевидно, в воде еще содержалось достаточно много углекислого газа. Что же мешало его выходу, и какую роль сыграл здесь сахарный песок?

Бурного выхода газа и появления пены можно добиться и другими путями, например перемешиванием жидкости или переливанием ее из одного стакана в другой.

Наконец, возьмем маленький кусочек шоколада (можно ягоду) и бросим его в стакан. Шоколад тяжелее воды и поэтому

¹ Дополнительное давление на пузырек можно оценить по формуле $p = 2\sigma/r$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения, r – радиус пузырька. Такое же давление испытывает жидкость в капилляре непосредственно под выпуклой (полусферической) поверхностью.

пойдет ко дну. Здесь он начнет обрастать пузырьками газа, и они, как поплавки, поднимут шоколад на поверхность. Пузырьки выйдут в воздух, кусочек шоколада вновь опустится на дно и т.д. Иногда такое всплытие и погружение может повторяться до десяти раз.

Как ответить на поставленные вопросы?

По существу, все объяснение сводится к ответу на первый вопрос – почему газированная вода напоминает перегретую жидкость.

Наверное, многие из вас знают, как можно приготовить газированную воду. Нет, не промышленным способом, а обычным домашним – с помощью сифона и баллончиков с углекислым газом (CO_2). Газ из баллончика под давлением поступает в пространство над жидкостью. Для того чтобы он быстрее растворялся в воде, сифон встряхивают. Растворение газа происходит до наступления равновесия. Если он химически не реагирует с жидкостью, то равновесное содержание (плотность, концентрация) газа в жидкости пропорционально его давлению над поверхностью.²

(Известны и другие домашние способы приготовления «шипучки» – добавлением в воду лимонного сока, пищевой соды и т.п.)

Когда мы быстро открываем бутылку с газированной водой, газ, находящийся над поверхностью под давлением, быстро расширяется и одновременно охлаждается. Пары воды, выходящие вместе с ним, конденсируются, образуя туманное облачко (дымок). После того как давление над поверхностью жидкости значительно уменьшится, растворенный в воде углекислый газ начнет выходить из нее, причем как через поверхность газ – жидкость, так и путем образования пузырьков в объеме жидкости. Сначала, после открытия бутылки, когда равновесие нарушено особенно сильно и в воде имеется большой избыток углекислого газа, пузырьки образуются легко и в большом количестве. Поэтому жидкость начинает пениться. Постепенно пена спадает, хотя в воде все еще остается «лишний» газ. Но теперь образование пузырьков затруднено – концентрация газовых молекул стала меньше и случайным образом собраться им вместе и образовать сразу большой пузырек, который бы не

² В случае с углекислым газом и водой положение несколько сложнее, так как они реагируют друг с другом. Но получающаяся кислота – соединение нестойкое и легко распадается.

раздавили силы поверхностного натяжения, трудно. Пузырьки начинают расти только на неоднородностях в воде, и это действительно похоже на поведение перегретой жидкости.

Объяснить все последующие опыты, наверное, не составит для читателя большого труда.

Совершенно неожиданное применение газированной воды

Мы начали с рассказа о пузырьковой камере. Кончить нам хочется рассказом еще об одном применении пузырьков, причем тоже в физике элементарных частиц.

Несколько лет тому назад перед советскими физиками, исследующими свойства нейтрино, встала следующая задача. Необходимо было из большого объема жидкости (сотни литров) извлечь несколько атомов газа, которые образовались в этом объеме под действием нейтринного излучения. Газ был радиоактивный (неон-19), и его атомы распадались за время, меньшее одной минуты. Поэтому буквально за секунды надо было среди 10^{28} атомов жидкости разыскать 5 — 10 атомов газа, извлечь их, транспортировать в счетчик и сосчитать! На первый взгляд, задача казалась нерешаемой.

На помощь пришла идея газированной воды. Жидкость перед облучением насыщалась углекислым газом. Сразу после облучения объем открывался, и жидкость энергично перемешивалась специальными лопастями. Происходило бурное кипение, тем самым поверхность, через которую могли выйти атомы неона, увеличивалась в десятки тысяч раз. Выходящий углекислый газ выносил эти атомы, а сам поглощался в другом сосуде (в растворе щелочи). Неон собирался в специальной пробирке и в ней быстро перемещался в счетчик. Вся процедура занимала меньше двадцати секунд.

МОСТИК ИЗ БУМАГИ

А.Боровой

Одно из важнейших свойств любых инженерных конструкций – их жесткость. Понятно, что ни под действием собственной силы тяжести, ни под влиянием внешних нагрузок конструкция не должна изменять свою форму. Правда совсем избежать деформации невозможно, но нужно так выбрать материал, тип деталей, чтобы изменения формы происходили до определенного, заранее рассчитанного предела. Эта задача, стоящая перед инженерами, почти всегда дополняется другой: сделать конструкцию наиболее простой, дешевой, легкой, истратить на нее как можно меньше материалов.

Лавируя между этими противоречащими друг другу требованиями, инженеры-конструкторы находят оптимальное для данной задачи решение. В ряде отраслей промышленности, как например в авиастроении, вопрос о сочетании максимальной жесткости и одновременно минимальной массы жизненно важен.

Великим конструктором является природа. Давно уже решила она многие задачи, волнующие инженеров. В ходе естественного отбора возникли такие шедевры, как перо птицы, стебель бамбука, полые кости наземных животных и т.п.

Мы недаром привели в качестве примера природные конструкции, имеющие в своей основе трубку – полый цилиндр. Почему они получили такое широкое распространение?

Попробуем разобраться в этом. А начнем с весьма простого эксперимента.

Опыт, который предлагается провести, известен в литературе как «Опыт Умова» (или «Прочность трубки»).

Николай Алексеевич Умов (1846–1915) был крупным русским физиком, на протяжении почти двадцати лет – профессором Московского университета. Наиболее важные его работы связаны с вопросом переноса энергии, он впервые ввел понятия скорости и направления движения энергии, потока энергии, плотности энергии в данной точке и

Опубликовано в «Кванте» №6 за 1985 год.

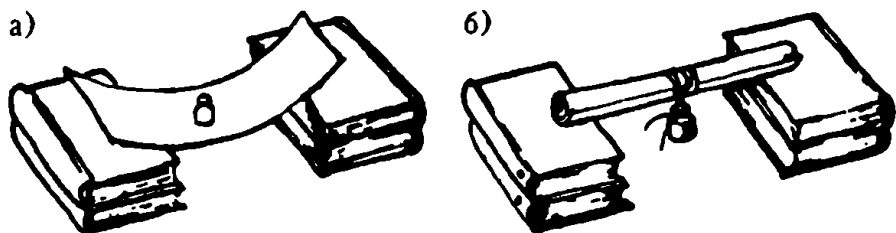


Рис. 1

т.п. Известен был Умов и как прекрасный лектор, уделяющий много внимания демонстрационным экспериментам.

В домашних условиях опыт можно выполнить с помощью совсем простой «аппаратуры». Вырежьте из плотной бумаги два прямоугольника длиной около 20 см и шириной около 8 см. Затем, используя в качестве подставок две стопки книг так, как это показано на рисунке 1, положите на них один из листов и нагрузите его легкими гирьками (а если таких нет, то монетами). Под малым грузом листок — своеобразный мостик — сильно прогнется (см. рис.1,а).

Оказывается, жесткость нашей конструкции можно увеличить в десятки раз, причем очень простым способом. Для этого второй листок сверните в трубку и обмотайте ниткой, чтобы он не развертывался. Вы увидите, что под прежним грузом трубка практически не прогибается (см. рис.1,б). Только значительно большая гиря заставит ее заметно деформироваться.

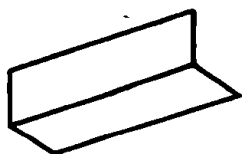
А насколько жестко, например, перо птицы? Проведите аналогичные испытания. В наших опытах гусиное перо длиной около 10 см «держало» гирию массой 0,5 кг.

«Опыт Умова» можно существенно видоизменить. Изготовьте из одинаковых листов бумаги так называемые профили: углы с равными и неравными сторонами, швеллеры, тавры и двутавры, гофрированный лист (рис.2). Убедитесь, что все они имеют гораздо большую жесткость, чем исходный мостик из бумаги. Для этого проведите ряд сравнительных опытов: определяйте величину прогиба при равных грузах или добивайтесь одинакового прогиба, нагружая конструкцию различными гирьками.

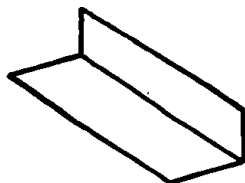
Теперь надо, хотя бы на качественном уровне, разобраться, от чего же зависит жесткость конструкции по отношению к изгибу.

Проделайте еще один опыт. Для него вам понадобится прямоугольный брусок из резины (или другого упругого материала) с поперечным сечением приблизительно $1 - 2 \text{ см}^2$ и длиной около 10 см.

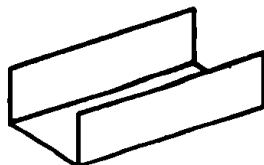
Нанесите на брусок масштабную сетку из продольных и



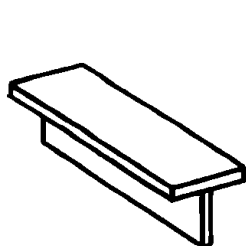
Угол с равными сторонами



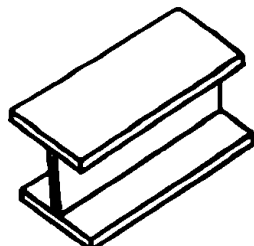
Угол с неравными сторонами



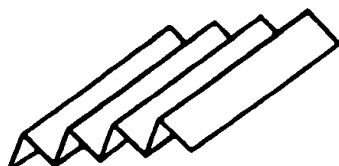
Швеллер



Тавр



Двутавр



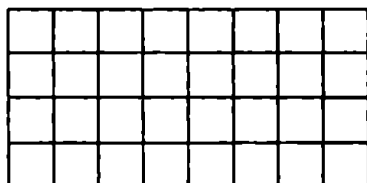
Гофрированный лист

Рис. 2

поперечных прямых линий (рис.3,а). Затем согните брусок – сетка исказится (рис.3,б). При этом поперечные линии останутся прямыми, но повернутся относительно друг друга и перестанут быть параллельными, а продольные линии искривятся. Нетрудно заметить, что материал бруска на одной стороне испытывает растяжение, а на другой – сжатие. Но среди продольных линий есть одна, идущая посередине, которая не изменяет своей длины. Очевидно, что и весь слой материала, лежащий за этой линией, не испытывает деформации. Поэтому он носит название нейтрального слоя (или нейтральной поверхности).

Из этого опыта следует, что чем дальше от нейтральной поверхности расположен участок бруска, тем большее растяжение (или сжатие) он испытывает. Тогда, согласно закону Гука, и сила упругого сопротивления изгибу возрастает по мере

а)



б)



Рис. 3

удаления от нейтрального слоя. Другими словами, основной вклад в жесткость бруска вносит слой, наиболее далекий от нейтрального. А отсюда вывод: чтобы увеличить жесткость конструкции, надо расположить ее основной материал как можно дальше от этого слоя. Вот почему листок бумаги в «Опыте Умова» почти не оказывает сопротивления нагрузке, а, например, двутавр из того же материала ведет себя значительно жестче.

Однако удалением основного материала от нейтральной поверхности слишком увлекаться нельзя. Так, если двутавровую балку сделать в середине очень тонкой, она станет неустойчивой и будет скручиваться. В то же время правильно сконструированный двутавр при одинаковой жесткости со сплошной балкой квадратного сечения оказывается в четыре с половиной раза легче. Полый цилиндр, в силу своей симметрии, одинаково реагирует на нагрузку с любой стороны, и материал его достаточно удален от нейтральной поверхности, вот почему во многих случаях именно он является оптимальной конструкцией. По сравнению со сплошной цилиндрической балкой полая мало проигрывает в жесткости по отношению к изгибу, но сильно выигрывает в экономии материала. Например, если внутри сплошного цилиндра диаметром D сделать отверстие диаметром $D/2$, то, как показывают расчеты, жесткость балки уменьшится всего на 6–7%, а экономия материала составит около 25%.

Теперь понятно, почему природа так широко использует трубчатые конструкции. А родились они в процессе эволюции. Пока жизнь сосредоточивалась в воде, особой необходимости в малой массе скелета не было – помогала выталкивающая сила жидкости. Поэтому у акул, например, сохранился от предков массивный хрящевой скелет. Но вот живые существа вышли на сушу. Теперь прочность скелета должна была сочетаться с возможно меньшей его массой. Миллионы лет длился процесс превращения хрящевых образований в трубчатые кости и закончился созданием прочной, легкой и весьма экономной по расходованию материала конструкцией.

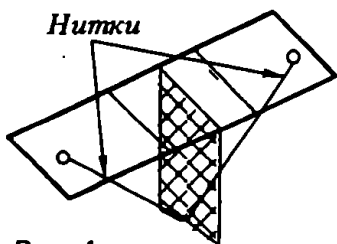


Рис. 4

Попытки построить бумажный мостик между двумя стопками книг привели к тому, что мы на опыте (а потом и качественными рассуждениями) убедились в том, что его надо делать не плоским, а профилированным.

Есть и другой способ увеличить жесткость мостика – использовать конструкцию, называемую фермой. Простейшую ферму, представленную на рисунке 4, легко изготовить самостоятельно. К середине листка бумаги приклейте поперечную полосу, соединенную натянутыми нитками с концами листка. (Подумайте, как прочно закрепить концы ниток.)

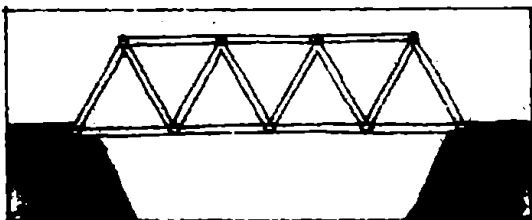


Рис. 5

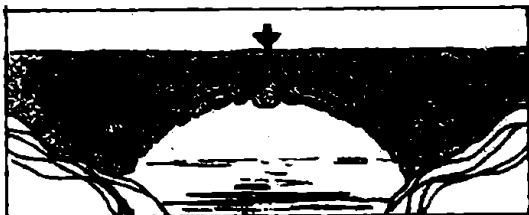


Рис. 6

Теперь, если мостик нагрузить, он начнет прогибаться и нитки натянутся сильнее. Разорвать их достаточно трудно, и поэтому такая конструкция значительно жестче, чем плоский листок.

Фермы очень часто используются в строительстве мостов (рис.5). С их помощью напряжение изгиба переводится в напряжение растяжения или сжатия балок и стержней, роль которых в нашем опыте сыграли нитки.

Можно упомянуть еще одну очень распространенную в строительстве конструкцию – арочный мост (рис.6). Арки были известны с глубокой древности, чуть ли не с начала четвертого тысячелетия до нашей эры. Принцип их действия состоит в трансформации вертикальных нагрузок в боковые давления арочного кольца, которые передаются на основание (пятю) арки.

Вообще различных конструкций мостов существует великое множество. Ведь, кроме решения инженерных и экономических вопросов, создатели моста должны еще «привязать» его облик к местности, добиться того, чтобы он был красив. Никакого общего рецепта здесь не существует, и, может быть, это и к лучшему.

В заключение статьи мы хотели бы напомнить читателям, что для многих выдающихся изобретателей и инженеров создание в детстве макетов самых разных машин и конструкций было как бы первым шагом к выбору своей дальнейшей специальности. «Интерес к технике у меня появился при изготовлении строительных моделей и не столько моделей, сколько, главным образом, макетов (в период 6 – 7 классов)», – так писал крупный ученый, конструктор и инженер в области транспорта академик В.Н.Образцов.

Существуют вещества, которые под воздействием света начинают светиться сами, причем, как правило, светом другого цвета (например, при облучении синим светом они испускают желтый или зеленый свет). Явление это называют фотолюминесценцией, т.е. свечением под действием света (от греческого «фотос» – свет и латинского «люминесценция» – слабое свечение). Основные особенности фотолюминесценции были выявлены благодаря работам известного советского физика С.И.Вавилова и его сотрудников.

Механизм этого явления был выяснен лишь после создания квантовой теории света. Попробуем очень кратко проиллюстрировать его на примере одной молекулы какого-либо органического люминесцирующего вещества. Такую молекулу можно считать практически самостоятельным «приемником» и «излучателем» света. Сначала она поглощает квант падающего на нее видимого света и переходит в возбужденное состояние, затем возвращается в исходное состояние, но при этом излучает квант видимого света уже меньшей энергии. Оставшаяся часть поглощенной энергии переходит в энергию теплового движения.

Процесс переизлучения может происходить очень быстро, практически мгновенно. В таких случаях говорят о флуоресценции. Стоит прекратить облучение флуоресцирующего вещества светом, и сразу же пропадает его свечение. Так бывает обычно с газообразными и жидкими люминофорами (веществами, способными к люминесценции). В других случаях вещество может продолжать светиться и после того, как погас возбуждающий источник света (иногда свечение длится до нескольких часов и даже дней). Тогда говорят о фосфоресценции. Наибольшее распространение получили кристаллические фосфоресцирующие вещества, называемые кристаллофосфорами. Впрочем, раз-

Опубликовано в «Кванте» №9 за 1985 год. (Тогда автор этой статьи учился в 9 классе 57 (специальной) московской школы.)

деление по длительности послесвечения достаточно условное, поскольку четкой временной границы не существует.

Надо сказать, что люминесценцию можно вызывать не только светом. Энергию, необходимую для излучения света, молекулы вещества могут позаимствовать, например, у электрического поля (электролюминесценция), при химических превращениях (хемилюминесценция), под воздействием проникающей радиации (например, катодолюминесценция, рентгенолюминесценция и тому подобное). Однако мы ограничимся лишь фотолюминесценцией.

Начнем с опытов, в которых исследуются свойства флуоресцирующих жидкостей.

Опыт 1. Нам потребуется источник света и прозрачная кювета. В домашних условиях в качестве источника можно использовать диапроектор, в который вместо диапозитива надо вставить кусочек картона или фольги с вырезанной в центре дырочкой (диаметром 2 — 3 мм). Это позволит получить слаборасходящийся пучок света. Кюветой может служить флакон из-под одеколона и тому подобное. Если сосуд наполнить чистой водой и посмотреть на него сбоку, то луч света в воде практически виден не будет (его видно только на границах вода — стекло). Если же воду заменить керосином, то внутри кюветы мы увидим синевато-белесую полосу. Причина этому — флуоресценция керосина.

Флуоресценцию можно наблюдать и на других растворах: желто-зеленое свечение — для риванола (продается в аптеке), голубое — для отработанного фотопроявителя. Красивые эффекты переизлучения получаются, если использовать некоторые шампуни (мы испробовали «Яблочный» и «Сосна»), которые содержат флуоресцирующие добавки. Правда, оказалось, что для получения яркой флуоресценции необходимо сильно разбавить шампунь водой. Почему — можно понять, проделав следующий опыт.

Опыт 2. Наполним сосуд раствором шампуня в воде, таким, чтобы яркость флуоресценции была достаточно большой. Затем начнем добавлять понемногу раствор йодистого калия. Яркость свечения будет убывать, пока, наконец, раствор не перестанет флуоресцировать совсем. Явление это носит название тушения люминесценции. Качественно объяснить его можно так. Молекула жидкости, облучаемой светом, находится в возбужденном состоянии в течение ничтожного, по обычным меркам, промежутка времени — порядка 10^{-8} — 10^{-9} с. Но и за это малое время она может столкнуться с молекулой тушащего вещества (в нашем случае — йодистого калия) и передать ей часть или всю энергию

возбуждения, которая в конечном итоге перейдет в тепло. Таким образом, процесс переизлучения не осуществится.

Аналогичные события происходят и при большой концентрации флуоресцирующего вещества. Его молекулы интенсивно сталкиваются, и при этом их избыточная энергия (энергия возбуждения) легко переходит в тепло. Именно поэтому растворы с большой концентрацией шампуня слабее излучают свет.

Понятно, что вероятность столкновения между молекулами тем выше, чем выше температура раствора. Значит, повышение температуры тоже оказывает тушащее действие. Это вы можете проверить самостоятельно.

Опыт 3. В предыдущем эксперименте мы тушили флуоресценцию. Теперь попробуем усилить яркость свечения.

Как показывает опыт, в водных растворах довольно сильное тушащее действие оказывают водородные ионы. Попробуем уменьшить их концентрацию, добавив в раствор шампуня несколько капель раствора щелочи (KOH или NaOH) – яркость флуоресценции заметно увеличится.

Опыт 4. Поставим на пути луча от диапроектора синий светофильтр. Раствор риванола в кювете продолжает светиться характерным для него цветом. То же происходит и при зеленом светофильтре, а вот красный приводит к исчезновению флуоресценции. Почему?

В 1852 году английский физик и математик Дж. Стокс установил, что при фотолюминесценции длина волны излучаемого света больше длины волны возбуждающего света (правило Стокса). Эту закономерность легко понять, если вспомнить объяснение механизма фотолюминесценции, приведенное в начале статьи.

Иногда, правда, правило Стокса нарушается, и энергия переизлученного кванта оказывается больше энергии поглощенного кванта. Это означает, что молекула, находясь в возбужденном состоянии, получила дополнительную порцию тепловой энергии, перешла в еще более высокое энергетическое состояние, а затем всю свою избыточную энергию отдала световому кванту.

Вернемся к опыту. Если учесть, что λ синего света $<$ λ зеленого света $<$ λ желтого света $<$ λ красного света, то становится ясным, что в нашем случае закон Стокса выполняется.

* * *

Во всех рассмотренных до сих пор опытах мы наблюдали флуоресценцию жидкостей. Теперь переходим к опытному излучению фосфоресценции кристаллов.

Внешние различия этих разновидностей люминесценции – по длительности послесвечения – обусловлены различиями в протекании самого процесса перензлучения. В первом случае «ячейкой» фотолюминесценции является отдельная молекула. Внутри нее происходят процессы возбуждения и возвращения в невозбужденное состояние, которое и сопровождается излучением света. Во втором же случае в люминесценции участвует не отдельная молекула, а их большое число – практически вся кристаллическая решетка.

К кристаллофосфорам относятся некоторые сульфиды (химические соединения металлов с серой), прежде всего – сульфиды металлов II группы Периодической системы элементов: CaS , ZnS , SrS , BaS . Наиболее известный из них – серный цинк ZnS , с которым мы и будем экспериментировать.

Для приготовления сульфида цинка необходимо взять 1 весовую часть порошка серы (серного цвета) и 2 весовые части порошка цинка. Смешав эти вещества, их нагревают. (Из-за резкого запаха выделяющихся газов опыт лучше проводить либо на открытом воздухе, либо в вытяжном шкафу школьного химического кабинета.) Получившийся сернистый цинк перемешивают с клеем и наносят на лист картона – фосфоресцирующий экран готов.¹

Сразу же можно приготовить и другой фосфоресцирующий экран, добавив к первоначальной смеси порошков серы и цинка немного медных опилок.

Затем приступим к опытам.

Опыт 5. Осветим лучом от диапроектора экран с сернистым цинком (сами постараемся на свет не смотреть) и выключим источник. В наступившей темноте в течение нескольких десятков секунд экран будет светиться слабым зеленым светом. Прделаем тот же опыт с экраном, активированным медью. Свечение его будет другим по оттенку, ярче и продолжительнее по времени.

Опыт 6. Оказывается, если фосфор нагреть, скорость его высвечивания возрастет. Нагреем монету и (после выключения света) приложим ее к обратной стороне экрана. В месте соприкосновения с монетой экран ярко вспыхнет, но зато и быстро погаснет – место монеты в дальнейшем будет отмечено темным пятном на затухающем свете экрана.

Опыт 7. До сих пор мы облучали люминофоры только видимым светом. Интересно, как они поведут себя, если на них

¹ Сульфид цинка можно «раздобыть», соскоблив его с слочных игрушек, светящихся в темноте.

подействовать лучами невидимой части спектра, например ультрафиолетовой?

Воспользуемся ультрафиолетовой лампой, продающейся в магазине. В темноте направим пучок ультрафиолетовых лучей на экран из сернистого цинка. Мы увидим, как сернистый цинк ярко вспыхнет.

Способностью люминесцировать в ультрафиолетовых лучах обладают многие вещества, даже те, которые не люминесцируют при обычном освещении.

Люминесценция нашла практическое применение, прежде всего, в лампах дневного света (люминесцентных лампах). В таких лампах, содержащих пары ртути, возбуждается газовый разряд, который сопровождается свечением, содержащим, в основном, ультрафиолетовые лучи. Стенки ламп, покрытые люминофорами специального состава, поглощают ультрафиолетовый свет и превращают его в видимый.

Такие лампы значительно более экономичны, чем лампы накаливания. Кроме того, спектральный состав их света ближе к дневному и поэтому приятен для глаз.

* * *

Вы познакомились лишь с небольшой частью опытов, которые можно провести с люминесцирующими веществами. Одни из них мы попытались объяснить, другие оставили без объяснения, поскольку оно существенно выходило бы за рамки школьной программы по физике.

Срезанная ветка растения начала вянуть. Но вот вы опускаете ее в воду, и по прошествии сравнительно небольшого времени листья расправляются, вновь становятся упругими, наливаются влагой.

Почему оживает ветка? Какие силы заставляют влагу проникать в растение и двигаться внутри него? Что удерживает воду в клетках и не дает ей выходить наружу? Каким образом клетка растения оказывается проницаемой для воды только в одном направлении: снаружи – внутрь?

Ученые очень давно пытались ответить на эти вопросы, но определенной ясности удалось добиться только в конце XIX века. Прошло еще некоторое время, и в лабораториях сумели смоделировать (хотя и очень грубо) эти природные явления. А уже в наши дни их с успехом заставили работать в самых разных областях науки и техники.

Кто и как обнаружил явление осмоса

В 1748 году французский физик-экспериментатор Ж.А.Нолле, занимаясь изучением кипения жидкостей, столкнулся с неизвестным до тех пор явлением. В одном из своих опытов он герметично закрыл стакан со спиртом пленкой бычьего пузыря и погрузил его на дно большого сосуда с водой. Через несколько часов пузырь сильно раздулся – вода проникла в стакан и увеличила давление в нем. Нолле не прошел мимо этого удивительного факта и объяснил его следующим образом: «Животный пузырь может быть более проницаем для воды, чем для спирта; в таком случае скорость прохождения воды окажется больше скорости прохождения спирта».

Повторим опыт Нолле, но используем менее дефицитные материалы – бычий пузырь заменим листком целлофана, а спирт – водным раствором сахара.

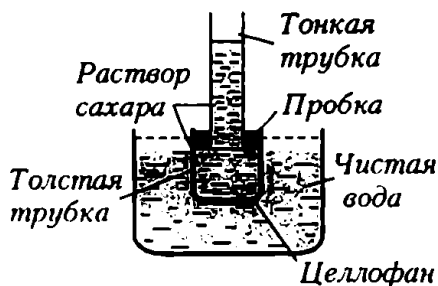


Рис. 1

На рисунке 1 изображен прибор, который изготовить несложно. В банку с чистой водой опущена широкая стеклянная трубка, затянутая снизу целлофаном. Целлофан закреплен так, чтобы вода не затекала внутрь трубки (герметизацию можно осуществить с помощью липкой ленты, резинового колечка, пластилина и т.п.). Сверху в толстую трубку через резиновую пробку входит тонкая стеклянная трубка.

В начале опыта в трубки наливают раствор сахара до тех пор, пока уровни жидкостей в трубках и в банке не совпадут (этот момент показан на рисунке 1 штриховой линией). Через некоторое время можно заметить, что высота столба раствора увеличится – так же, как и в опыте Нолле, вода начнет свое движение через пленку, в нашем случае целлофановую.

Явление, при котором наблюдается одностороннее проникновение растворителя через полупроницаемую перегородку, отделяющую раствор от чистого растворителя, называется осмосом. Слово это имеет греческое происхождение и означает толчок, давление.

Повторив опыт французского физика, впервые обнаружившего осмос, попробуем разобраться в этом явлении.

Осмос и односторонняя диффузия

Вспомним, что происходит при растворении какого-нибудь вещества в растворителе. Молекулы вещества проникают в растворитель, а молекулы растворителя – в область, занятую раствором. Такая взаимная диффузия (проникновение) и приводит к выравниванию концентраций растворенного вещества и растворителя по всему объему.

Теперь представим себе ситуацию, при которой раствор и чистый растворитель разделены полупроницаемой перегородкой – она пропускает молекулы растворителя, но не пропускает молекулы растворенного вещества. Очевидно, что в этом случае выравнивание концентраций может происходить только за счет односторонней диффузии растворителя.

Именно так и происходит в поставленном нами опыте. Целлофан «непрозрачен» для молекул сахара, но «прозрачен» для молекул воды, поэтому при одинаковой в начальный момент высоте жидкостей (одинаковом давлении на перегородку) в банке

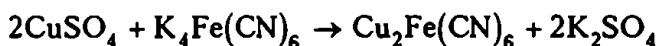
и трубках через целлофан проходит больше молекул воды снизу вверх, чем сверху вниз. В результате уровень жидкости в банке начинает понижаться, а в трубках – повышаться. Другими словами можно сказать, что вода проникает в раствор под действием сил так называемого осмотического давления. Как только гидростатическое давление столба раствора уравнивает осмотическое давление, процесс прекратится. Высота этого столба и служит количественной мерой осмотического давления.

Полупроницаемые перегородки и «искусственная клетка»

После работы Нолле многие ученые – ботаники, физики – стали ставить опыты и изучать явление осмоса. Для полупроницаемых перегородок они использовали самые различные природные материалы: кожу от яйца, бычьи и свиные пузыри, перепонки и т.п.

В середине XIX века (в 1866 г.) немецкий ученый М.Траубе изобрел способ получения искусственных полупроницаемых пленок из железисто-синеродистой меди $\text{Cu}_2\text{Fe}(\text{CN})_6$. Они были хорошо проницаемы для воды, но не пропускали большинство других веществ. Мы можем убедиться в этом с помощью красивого эксперимента, который получил название «искусственная клетка». Не следует пугаться громоздкой химической формулы пленки. В домашних условиях ее можно получить, используя в качестве исходных веществ медный купорос CuSO_4 и желтую кровяную соль $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ – реактивы, продающиеся в магазинах фотоматериалов.

Нальем в пробирку слабый (приблизительно трехпроцентный) раствор медного купороса и бросим на дно кристаллик желтой кровяной соли. Кристаллик должен быть чистым – лучше всего его отколоть от большого кристалла перед самым опытом. В результате реакции



поверхность кристаллика покрывается полупроницаемой пленкой.¹ Вода проникает через нее и вызывает рост «клетки». Оболочка «клетки» расширяется, а в тех местах, где пленка лопается под действием внутреннего давления и раствор частью выливается наружу, сразу же снова образуется полупроницае-

¹ Описанный опыт требует от экспериментатора осторожности в обращении с реактивами. Нельзя, чтобы они попадали на руки, стол и т.п. Если все же это произойдет, надо их сразу же смыть большим количеством воды.



Рис. 2

мая оболочка. Таким образом «клетка» постепенно принимает ветвистую форму. Можно сказать, что «искусственная клетка» ведет себя подобно живому организму.

Этот классический опыт требует терпения и аккуратности, красивые «растения» с первой попытки могут и не получиться.

В наши дни можно поставить более эффектный и доступный эксперимент, в котором искусственные «растения» выращиваются в водном растворе жидкого стекла (кремнекислый натрий Na_2SiO_3 — силикатный канце-

лярский клей). Удастся вырастить целый «сад» (рис.2), если бросить в этот раствор кристаллы хлористого кобальта, сернокислого железа, хлористого никеля, сернокислого марганца и многих других веществ, которые читатель может подобрать самостоятельно.

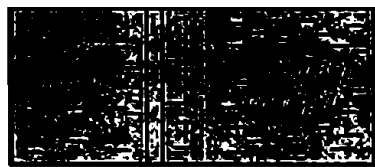
Опыт с осмометром и создание теории осмоса

Прошло десять лет с тех пор, как Траубе получил первую искусственную полупроницаемую пленку, и в 1877 году немецкий ботаник В.Пфедфер создал прибор для измерения осмотического давления — осмометр. Конструкция, которой мы воспользовались, воспроизводя опыт Нолле (см. рис.1), во многом повторяет идею Пфедфера.

С помощью осмометра ученый показал, что осмотическое давление зависит только от концентрации, но не от природы растворенного вещества (для слабых растворов), и увеличивается с повышением температуры. Его измерения показали также, что осмотическое давление может быть очень большим — достигать нескольких атмосфер.

Так впервые были получены количественные данные об осмосе, которые помогли выдающемуся голландскому химику Я.Вант-Гоффу создать теорию этого явления. В 1887 году ученый опубликовал работу, в которой показал, что молекулы растворенного вещества ведут себя в растворе так же, как молекулы идеального газа в сосуде. А растворитель в этом случае играет роль... пустоты!

Чтобы понять ход рассуждений Вант-Гоффа, поставим мысленный эксперимент. Пусть горизонтальный цилиндр, наполненный водой, разделен на две равные части целлофановой перегородкой, которая может смещаться без нарушения герметичности. Если в одной части



Целлофан

Рис. 3

цилиндра растворить сахар, то за счет диффузии чистой воды сквозь целлофан в область раствора давление там повысится и перегородка начнет смещаться (рис.3). Объем раствора будет увеличиваться, объем чистой воды – соответственно уменьшаться. Но по результатам это эквивалентно предположению, что молекулы сахара в растворе оказывают дополнительное давление на перегородку. Растворенное вещество стремится расшириться и сдвинуть целлофан – точно так же, как газ стремится расшириться и сдвинуть поршень, отделяющий его от вакуума.

С помощью такого предположения Вант-Гоффу удалось объяснить все особенности осмоса, обнаруженные Пфедером. Ученый вывел уравнение, полностью аналогичное уравнению состояния идеального газа:

$$\pi V = nRT,$$

где π – осмотическое давление, V – объем раствора, n – число молей растворенного вещества, R – универсальная газовая постоянная, T – температура. Было показано, что сходство между поведением растворенного вещества и поведением газа существует только для очень разбавленного раствора, такого, в котором взаимодействием молекул растворенного вещества между собой можно пренебречь.

Теория Вант-Гоффа подтвердилась многими опытами. Ее автор стал первым лауреатом Нобелевской премии по химии (в 1901 году) за «открытие законов химической динамики и осмотического давления».

Ответы на поставленные раньше вопросы

Мы начали эту статью с вопроса о том, какие силы заставляют влагу проникать в клетки растения и двигаться внутри него. Теперь можно на него ответить – в основном это силы, связанные с осмосом. Внешний слой цитоплазмы клетки представляет собой полупроницаемую оболочку, которая и позволяет клетке регулировать водный обмен с окружающей средой. Если, например, она потеряла влагу и концентрация солей в клеточном соке повыси-

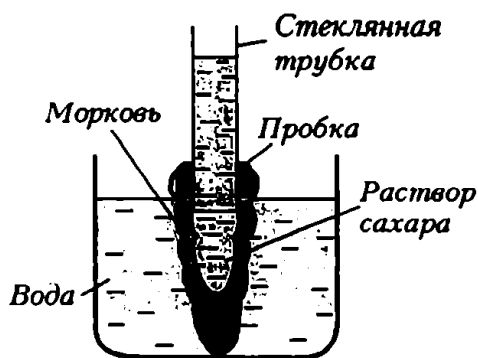


Рис. 4

лась, проникновение воды внутрь клетки увеличивается, пока сила осмотического давления не уравнивается силами упругости растянутой оболочки.

Чтобы убедиться в полупроницаемости естественных клеток, можно сконструировать осмометр, в котором роль перегородки играет ...морковь (рис.4). Правда,

такой прибор не будет очень точным, поскольку клетки моркови все же частично проницаемы для сахара.

Через огромную площадь листьев растений идет испарение влаги. Концентрация солей в древесном соке увеличивается, и осмотическое давление (наряду с другими причинами) заставляет воду подниматься вверх на десятки метров. При этом поднимается далеко не малое количество воды – несколько литров в сутки для лиственных деревьев. Недаром «плачут» надрезанные стволы и ветки деревьев или стебли трав.

Осмоз в наши дни

Уникальные свойства живых организмов, которые позволяют их клеткам избирательно поглощать и переносить различные вещества, стали предметом исследования многих ученых. Им удалось создать синтетические пленки – так называемые мембраны, непроницаемые для одних веществ и «прозрачные» для других. После этого такие «совершенные фильтры» (или даже «волшебные фильтры», как все чаще называют их в популярной литературе) начали завоевывать самые разные области науки и техники.

С их помощью очищают газы и нефтепродукты, опресняют морскую воду, обрабатывают молоко и фруктовые соки, производят лекарства и витамины и делают еще многое-многое другое. Приведем лишь несколько примеров.

Пожалуй, шире всего мембранная техника используется для получения пресной воды из морской. Здесь применяется способ «обратного осмоса» – под действием внешнего давления (большого, чем осмотическое) через полупроницаемую перегородку переносится чистая вода, освобождаясь от молекул растворенных в ней солей. Размеры и производительность таких установок колеблются в самых широких пределах – от пере-

носного прибора, очищающего несколько десятков литров воды в сутки, до стационарных опреснителей, снабжающих водой столицу Саудовской Аравии (их производительность порядка 120 000 м³ в сутки). При этом расходуется в десятки раз меньше энергии по сравнению с теми установками, в которых опреснение происходит за счет перегонки, т.е. дистилляции воды.

Одно из самых первых и, возможно, самых важных применений мембран связано с медициной – полупроницаемая перегородка служит для очистки крови у больных в аппарате «искусственная почка». Сейчас мембрана «овладела» и другими весьма разнообразными медицинскими специальностями. Так, можно сказать, что наступает время накожных капсул-наклеек. Это – мембранные системы, которые вводят лекарственные вещества в строго контролируемых количествах в кровеносные сосуды прямо через кожу, куда их приклеивают. Уже появились капсулы-наклейки с нитроглицерином для сердечных больных.

Многие крупные научно-производственные объединения занимаются совершенствованием мембранной технологии. Рождаются все новые и новые методы получения полупроницаемых пленок. Например, несколько лет назад их начали делать с помощью... ускорителей тяжелых ядер. Под пучком таких ядер синтетические пленки превращаются в... сито с аккуратными отверстиями диаметром в тысячные доли миллиметра.

Задача ближайшего будущего – создание полной количественной теории процессов, происходящих в «волшебных фильтрах», и, на ее основе, разработка мембран с заранее заданными свойствами.

Я.Гегузин

Из множества особенностей и свойств истинного сердца ртутное обладает лишь одним – способностью пульсировать, периодически меняя свою форму. Ртутному сердцу неведомы ни боль, ни перебои, ни волнения; перед настоящим сердцем оно имеет безусловное и завидное преимущество – может остановиться, сколь угодно долго просуществовать бездействуя, а затем снова ожить.

У нас в лаборатории в шкафу, где хранятся химические реактивы, живет ртутное сердце. Конструкция его совсем проста: фарфоровая чашка с вогнутым дном, на дне чашки – ртуть в виде расплющенной капли-лужицы (диаметром ≈ 4 см). Она залита толстым слоем слабого (пятипроцентного) водного раствора соляной кислоты (≈ 50 мл), в котором растворена соль двуххромовокислого калия ($K_2Cr_2O_7$; ≈ 60 мг). Фарфоровая чашка прикрыта плексигласовой пластинкой, в пластинке укреплена гайка, а в ней – винт, заканчивающийся железной проволокой-иглой. Вращая винт, проволоку можно опустить до соприкосновения с поверхностью ртути, и ртутное сердце начнет работать, т.е. ритмически пульсировать. Чтобы такое сердце работало надежно, проволока должна коснуться поверхности капли-лужицы либо в центре, либо в одной из точек на контуре.

Пульсация ртутного сердца – зрелище впечатляющее: на чистой поверхности капли возникают переливающиеся блики причудливой формы, и контур капли приобретает быстро меняющиеся очертания, которые повторяются в каждом очередном цикле пульсации. Сердце работает без усталости: мы оставляли его на час, на два, а однажды оставили на ночь – и утром нашли пульсирующим.

Теперь о механизме пульсаций ртутного сердца – лужицы ртути, которая непрерывно вздрагивает от соприкосновения с железной проволокой. Но вначале о двух эффектах, с которыми

Опубликовано в «Кванте» №2 за 1986 год.

необходимо ознакомиться, чтобы понять причину периодических сокращений и расширений ртутной капли.

Первый эффект заключается в уменьшении поверхностного натяжения металла, если на его поверхности имеется электрический заряд. Проще всего это понять на примере свободной сферической жидкой металлической капли, скажем капли ртути. Пусть радиус капли R . Если она не заряжена, вещество, находящееся в ее объеме, будет испытывать сжимающее давление $p_{сж} = 2\sigma/R$, которое связано с искривленностью поверхности (R) и поверхностным натяжением (σ). Допустим теперь, что по поверхности капли распределен заряд, величина которого q . Очевидно, что носители заряда будут отталкиваться друг от друга с силой, величина которой (в соответствии с законом Кулона) пропорциональна квадрату заряда. Значит, при неизменном объеме сферической капли (и, следовательно, при постоянном радиусе) наличие на ее поверхности электрического заряда приведет к понижению сжимающего давления. Это обстоятельство может быть представлено как следствие понижения поверхностного натяжения на величину $\Delta\sigma \sim q^2$.

Мы не стремились к тому, чтобы расчет был точен; важно лишь иметь основание утверждать, что величина понижения поверхностного натяжения не зависит от знака заряда, находящегося на поверхности. Порукой тому – квадратичная зависимость $\Delta\sigma$ от величины заряда q .

Все это нам необходимо знать, так как ртуть в растворе соляной кислоты получает заряд, и поэтому поверхностное натяжение на границе ртуть – раствор как бы понижается. (Мы не будем подробно интересоваться процессами на этой границе, так как они достаточно сложны.)

Описанный эффект влияния заряда на поверхности на величину поверхностного натяжения, который именуется электрокапиллярным эффектом, был открыт и изучен французским физиком Габриэлем Липпманом (1845–1921) и нашел множество практических приложений.

Второй эффект состоит в том, что в момент, когда металлическая игла соприкасается с поверхностью ртути, величина имеющегося на ртути заряда изменяется, следовательно, эффективное поверхностное натяжение также должно измениться. С помощью простого опыта легко убедиться в том, что в момент соприкосновения величина заряда на ртути уменьшается, а вместе с тем уменьшается и то понижение поверхностной энергии, которое наступило, когда капля ртути была залита раствором соляной кислоты.



*Пульсации ртут-
сердца, когда ме-
таллическая проволока
касается контура
ой капли-лужицы*

Два последовательных отрицания равносильны одному утверждению: уменьшение понижения означает повышение. В момент прикосновения железной иглы к поверхности ртути ее поверхностное натяжение немного увеличивается. Следствием этого увеличения должно быть некоторое сжатие капли-лужицы, которая на дне чашки под собственной тяжестью расплющилась, и частичное приближение ее формы к сферической. Это отчетливо наблюдается, если в центре капли в ее тело погрузить металлическую иглу: капля-лужица вздрогнет, и ее горизонтальный диаметр явно уменьшится.

Вот теперь можно понять механизм пульсаций. Начнем со случая, когда железная игла касается ртути в точке на контуре лужицы (рис.1). В момент соприкосновения иглы с поверхностью ртути — соприкосновения, а не внедрения! — поверхностное натяжение несколько повысится, ртутная лужица уменьшит диаметр, контакт между нею и иглой нарушится. После этого поверхностное натяжение должно возвратиться к значению, которое было до соприкосновения иглы с каплей, т.е. понизиться, а радиус ртутной лужицы должен возрасти. Это значит, что лужица соприкоснется с иглой, и все начнется снова: сокращение лужицы — нарушение

контакта, расширение лужицы — восстановление контакта и

интересен механизм возникновения пульсаций в том случае, когда игла прикасается к поверхности ртути не на контуре ртути, а в центре, в макушке (рис.2). Казалось бы, наступающее при повышении поверхностного натяжения должно сопровождаться поднятием макушки и образованием ненарушающегося контакта с иглой. В действительности, однако, происходит иное.

Макушка лужицы чуть наползает на иглу, а затем под действием силы тяжести отрывается от нее. Этот первый импульс дает толчок колебаниям, капля раскачивается, сердце начинает пульсировать.

Любопытная деталь: при переносе иглы с контура лужицы на ее макушку частота пульсаций увеличивается. Это совершенно аналогично повышению частоты колебаний гитарной струны, если пальцем прижать ее к грифу посередине между точками закрепления.

Необходимо подчеркнуть, что ртутное сердце отнюдь не вечный двигатель. Во время его работы расходуется энергия, выделяющаяся при химическом взаимодействии между ртутью, железом, соляной кислотой и двуххромовокислым калием. В этой реакции расходуются исходные компоненты, и она прекратится, когда, скажем, будет «съедена» железная игла. В «невечности» ртутного сердца можно легко убедиться, взяв более тонкую проволочку. Довольно скоро контакт между каплей и проволочкой перестанет воспроизводиться, так как кончик проволочки будет «съеден». Чтобы сердце опять заработало, надо проволочку придвинуть к лужице – явно не вечный двигатель!

Задумали мы снять кардиограмму ртутного сердца. Много сведений из нее не извлечешь, разве только определишь число пульсаций в секунду (а их можно просто посчитать, наблюдая за лужицей, или для верности воспользоваться кадрами кинофильма). То, что ртутное сердце здорово, просто отчетливо видно глазами: оно пульсирует ритмично, без перебоев, явно не уставая (частота пульсаций нашего лабораторного сердца – около 120 ударов в минуту). И все-таки снять кардиограмму любопытно.

Вначале решили воспользоваться работающим сердцем как прерывателем электрической цепи, регистрируя моменты вклю-

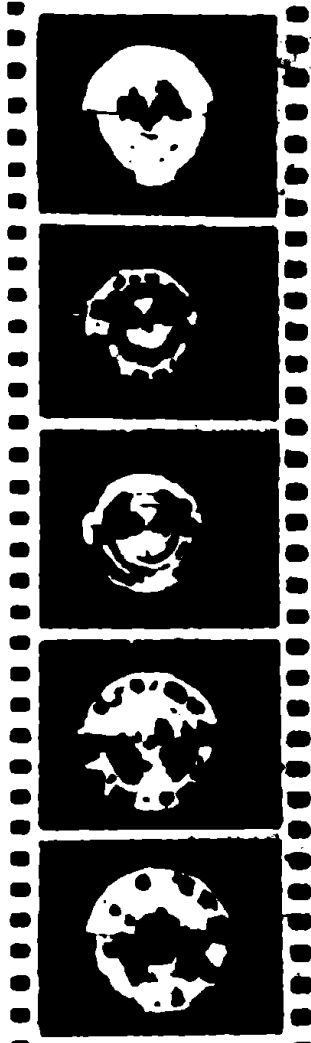


Рис.2. Пульсация ртутного сердца, когда металлическая проволока-игла касается макушки ртутной капли-лужицы

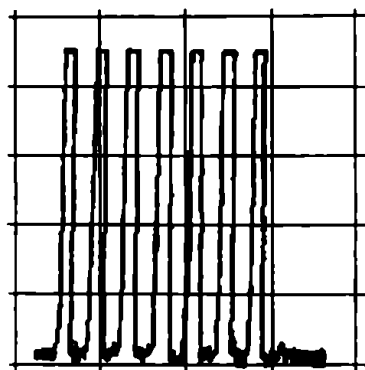


Рис.3. Кардиограмма ртутного сердца

тельность чередующихся максимумов и минимумов – четких, строгих, периодических, без перебоев, на зависть любому человеческому сердцу.

чения и выключения с помощью самопишущего прибора. От этой мысли, однако, отказались, так как любое электрическое вмешательство в ртутное сердце неизбежно исказило бы его пульсации. Поступили по-иному. Тоненький луч света направлялся на зеркальную поверхность пульсирующей лужицы, а отраженный от нее мечущийся луч подавал сигнал на самописец, который и записал кардиограмму (рис.3). На кардиограмме видна последова-

А.Боровой

Вы решили уехать загород. Собрали вещи, смотрите, не забыто ли что. И вот... на окне горшки с цветами. Захватить их с собой невозможно, и нет никого, кто мог бы поливать цветы в ваше отсутствие. Что же предпринять? Наполнить водой поддоны цветочных горшков? Такой способ полива годится не для всех растений – многие из них не терпят переизбытка влаги. А главное, он рассчитан на небольшой срок – несколько дней, неделю.

Вопрос этот не новый. Цветоводы давно придумали самые разные конструкции «автопоилок», которые действуют надежно и долго и даже дозируют воду для поливки цветов.

Простейшую автопоилку (рис. 1) можно легко сделать самим. Воду наливают во вместительный сосуд, накрытый крышкой. В этот сосуд опускают один конец туго свернутого жгута из марли, другой его конец закапывают в землю. Вода поступает к растению по жгуту, причем скорость ее поступления можно отрегулировать, изменяя толщину жгута, его наклон и т.п. Жгут следует поместить внутрь резиновой трубки, тогда вода будет меньше проливаться и испаряться по дороге к цветку.

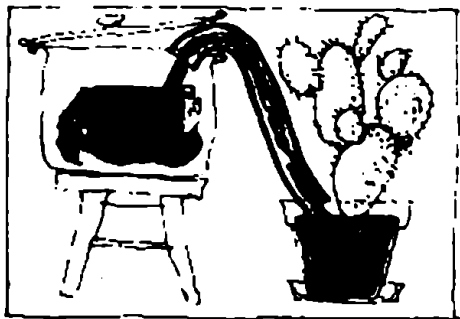


Рис. 1

И в жгуте, и в земле, наполняющей горшок, и частично в самих растениях

вода движется и удерживается за счет явления, которое называют капиллярностью.

Капилляр – это тонкая трубка, обычно ее внутренний диаметр меньше одного миллиметра. Если капилляр, сделанный из

Опубликовано в «Кванте» №4 за 1986 год.



Рис. 2



Рис. 3

чистого стекла, опустить в сосуд с водой, то уровень жидкости в нем будет выше, чем в сосуде (рис.2). Чем тоньше трубка, тем больше эта разница. Происходит это вследствие смачивания водой чистого стекла. В широком стеклянном сосуде поверхность воды лишь изгибается у самых стенок.

В почве капилляры образуются между ее частичками. Благодаря им влага может подниматься на значительную высоту: до 2 метров в песке, а в чистой глине – значительно выше. Процесс идет медленно и длится иногда несколько недель и даже месяцев. (Попробуйте самостоятельно придумать и провести эксперименты, в которых можно было бы наблюдать подъем воды в капиллярах почвы.)

Если внутренняя поверхность трубки не смачивается жидкостью, то в капилляре уровень ее ниже, чем в широком сосуде (рис.3). Изменяется и форма поверхности жидкости у стенок сосуда.

Интересно, что смачивание (или несмачивание) определяет, как поведет себя капля жидкости на поверхности другой жидкости. Например, капля подсолнечного масла или керосина растекается по воде тончайшим слоем, вплоть до мономолекулярного (т.е. толщиной всего в одну молекулу). Такое поведение смачивающих жидкостей позволило английскому физика лорду Рэлею оценить размер одной молекулы. На большую поверхность воды он помещал капельку оливкового масла и сначала убеждался в том, что масляное пятно покрывает поверхность равномерным слоем, без масляных «бляшек» и «окошек» воды. Для этого Рэлей использовал маленькие кусочки камфары. Если такой кусочек попадает на поверхность воды, он начинает «метаться». Дело в том, что в воде камфара растворяется и при этом поверхностное натяжение воды уменьшается. Но растворение происходит неравномерно: с одной стороны частички быстрее, с другой – медленнее, и на кусочек камфары начинает действовать разность сил поверхностного натяжения, вызывающая его движение. Вы легко можете наблюдать это явление, только, для того чтобы опыт прошел удачно, надо не касаться воды и кусочков камфары руками (лучше всего кусочки соскабливать ножом

прямо над поверхностью воды)). А вот в масле камфара не растворяется и ведет себя спокойно.

Итак, убедившись в однородности масляной пленки, ученый определял радиус пятна R и находил его толщину l :

$$l = V / (\pi R^2),$$

где V – объем капли масла. Если предположить, что капля растеклась в мономолекулярный слой, то толщина пятна – это характерный размер молекулы масла. Получилась величина, близкая к 10^{-9} м.

Смачивание очень часто приходит нам на помощь: мы смазываем трущиеся части машин – жидкая смазка обволакивает поверхность металла и удерживается на ней; расплавленное олово смачивает чистую медь, латунь, алюминий при пайке; клей растекается по поверхности склеиваемых материалов.

Практически во всех старинных осветительных приборах, начиная от древних светильников, в которых фитилек был погружен в нефть, растительное масло или жир, и кончая керосиновыми лампами, тоже использовалось явление смачивания: горючее вещество поднималось по капиллярам фитиля и постепенно сгорало.

Наблюдение такого необычного поведения жидкости, когда она движется против сил тяжести, вдохновляло многих изобретателей на создание *Perpetuum mobile* – вечного двигателя, который использовал бы свойства капилляров. Проекты были весьма разнообразными и появлялись не только в древности или в средние века, но даже и в начале XX века. Чаще всего идея заключалась в следующем: по фитилю жидкость (обычно вода) должна была подниматься из нижнего сосуда в верхний, а там уже по трубке или лотку стекать вниз, приводя в движение водяную мельницу (рис.4). Вопрос о том, почему фитиль, сумевший поднять воду на какую-то высоту, вдруг теряет свойство впитывать и удерживать жидкость и беспрятственно отдаст ее в верхнем сосуда, изобретателей как-то не тревожил. Само устройство не только не работало вечно, но и вообще не работало.

Совершенно особую роль играет смачивание в услови-

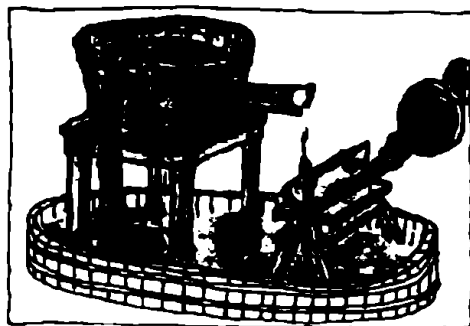


Рис. 4

ях невесомости. Вот что рассказывал летчик-космонавт А.А.Серебров (см. интервью с А.А.Серебровым, опубликованное в «Кванте» №4 за 1983 г. – *прим. ред.*):

«Представьте задачу: налить жидкость в сосуд без потерь. На космическом корабле вода подается из крана порциями по 25 см^3 . Предоставленные сами себе, порции собираются в шаровидные капли, как и положено в невесомости; эти капли в результате разных случайных воздействий потом дробятся на меньшие...

Если действовать, как на Земле, и наливать воду из крана в горлышко сосуда, то она станет выталкивать из сосуда воздух, в котором взвешены капли разного размера, – иными словами, будет сама же себя выталкивать.

Если же струю с малой скоростью направить сразу на стенку сосуда, то вода, смачивая стенку, прилипает к ней. Тогда взвешенных капель не будет – по крайней мере, до тех пор, пока сосуд не встряхнули. Таким способом можно без потерь налить жидкость в сосуд.

И тут же возникает второй вопрос: а как можно взять жидкость из сосуда? Ведь из-за невесомости жидкость «плавает» в сосуде в виде шаровых капель разного размера.

Конечно, если есть центрифуга, то задача решается просто: при вращении сосуда жидкость будет «прижиматься» к дальней от оси стенке, а оттуда ее можно забирать с помощью шприца. Если центрифуги нет, можно прижать жидкость к стенке, двигая сосуд с небольшим линейным ускорением. Именно так обычно и делают.

Я предложил другой способ: поместить внутрь сосуда длинный и узкий предмет, например черенок ложки, к которому капли прилипают. За счет поверхностного натяжения жидкость «расползается» по черенку и подходит к краю горловины сосуда. Слегка «помешивая» черенком, легко добиться того, чтобы жидкость постоянно находилась на черенке вблизи выходного отверстия сосуда. Задача, стало быть, решена».

НАБЛЮДЕНИЯ НАД ТУМАНОМ

А.Боровой

Присматривались ли вы к тому, как появляется над рекой вечерний туман? Он возникает не сразу, а сначала сгущается над водоворотами и перекатами. Отдельные легкие облачка в лунном свете напоминают женские фигуры в белых одеждах. И начинаешь понимать наших предков, создавших так много легенд о русалках.

Как часто удастся любоваться туманом, зависит от особенностей местности. Например, для жителей Ньюфаундленда, острова, расположенного у берегов Канады в месте, где теплое течение Гольфстрим сталкивается с холодным Лабрадорским течением, туманы – постоянные гости. Третью часть года, включая практически все летние дни, остров покрыт густой дымкой. Наверное, даже самое красивое описание тумана вряд ли вызовет восхищение у жителей Ньюфаундленда. Настоящая «страна туманов» – Англия, «туманный Альбион». У нас в стране наиболее богаты туманными днями побережья северных морей – Балтийского, Охотского, особенно Кольский полуостров.

Если там, где вы живете, природные туманы – редкость, не забудьте, что у себя дома их можно видеть буквально на каждом шагу. Белое облачко, появляющееся из носика кипящего чайника, – это туман. В обиходе мы называем его паром, но это неверно, поскольку пар воды представляет собой бесцветный газ. Если быстро открыть бутылку с газированной водой, то над горлышком в первый момент появится дымок – это тоже туман. На улице в морозный день туман клубится над открытой водной поверхностью, над прорубями или полыньями, врывается в комнату через открытую форточку, возникает при дыхании (опять-таки мы привыкли говорить – «пар от дыхания»).

Образование тумана связано с тем, что при понижении температуры воздуха водяные пары, содержащиеся в нем, в какой-то момент становятся насыщенными и при дальнейшем охлаждении начинают конденсироваться. И выделяют избыток

Опубликовано в «Кванте» №12 за 1986 год.

влаги в виде мельчайших капель на центрах конденсации – пылинках, частицах дыма, ионах газа и т.п. Когда капли появляются в воздухе, мы говорим о тумане. А капли на поверхности земли, на листьях и траве называем росой.

Чтобы представить себе, насколько изменяется содержание водяного пара в воздухе при изменении температуры, приведем такие цифры:

масса насыщенного водяного пара в 1 м^3 воздуха при 30°C составляет 30 г;

при охлаждении воздуха до 10°C масса насыщенного пара уменьшается до 10 г/м^3 ;

значит, в каждом кубометре воздуха 20 г воды должны выделиться в виде капель тумана или росы.

Размер капель, составляющих туман, вы можете определить следующим образом. Подержите в тумане стеклышко, смазанное вазелином, а потом рассмотрите под микроскопом оставшиеся на нем капли влаги. Микроскоп необходим, поскольку даже самые крупные капли достигают размеров всего лишь в десятки микрон, их диаметр почти в сто раз меньше толщины спички.

Обычно туманы не долговечны. Мелкие капли сливаются в более крупные и опускаются вниз – туман дождем выпадает на землю. Но может случиться и так, что в теплом потоке воздуха капли тумана испарятся и туман рассеется.

Все это можно наблюдать на простом опыте, для которого потребуется кофейник, сковорода и небольшой кусок резиновой трубки. Плотнo вставим трубку в носик кофейника, нальем в него воду и поставим на плиту. Когда вода закипит, из трубки начнет вырываться белая струя водяного тумана. Поднесем (с помощью пинцета) конец трубки к холодной сковороде, стоящей на соседней конфорке. Туман будет подниматься над ней и частично оседать каплями на холодную поверхность металла. Но если сковороду разогреть – туман пропадет. В потоке нагретого воздуха плотность водяного пара становится ниже насыщенной, и капли воды не образуются (или сразу испаряются).

«Граждане, рейс Москва – Воркута задерживается вылетом на два часа», – к сожалению, объявления такого рода нередко можно услышать в аэропорту. Чаще всего задержка происходит как раз из-за тумана. Именно он мешает принимать самолеты, идущие на посадку, и мешает их взлету. Как с этим бороться?

Сначала инженеры предложили почти очевидный способ, который так хорошо «работал» в опыте со сковородой. Дело было во время войны. Английские летчики должны были отражать налеты фашистов. Но Англия – страна туманов, и летчик,

вылетая с аэродрома, далеко не был уверен, что ему удастся совершить посадку в ясную погоду. И вот на шести английских аэродромах вдоль всей посадочной полосы запылали огромные факелы. Они подогревали воздух, капли тумана испарялись, и видимость повышалась во много раз – вплоть до километра.

Но способ этот оказался дорогим и неэффективным. Дело в том, что при сгорании нефть сама образует много водяных паров, они непрерывно пополняют «резервы» тумана, и факелам в основном приходилось бороться самим с собой. В результате на каждом аэродроме за секунду сгорала целая бочка нефти. Если для небольших аэродромов это было уже достаточно накладно, то для современных взлетных полос потребовалась бы целая река нефти. От подогрева воздуха пришлось отказаться.

Более перспективным оказалось рассеяние над аэродромом веществ, поглощающих влагу, например тончайшего порошка хлористого кальция. Его частицы собирают капли тумана в более крупные, которые выпадают на землю дождем. Влажность воздуха падает, и туман рассеивается.

Раз речь зашла о туманах и самолетах, мы хотели бы упомянуть еще о двух связывающих их фактах.

Каждый из вас, наверное, не раз замечал в небе белый след от летящего самолета. Это – туман, образующийся из паров воды, поставщиком которых служит сгорающее топливо.

Куда более страшный «туманный след» может тянуться за самолетом, потерпевшим аварию. Это – след из горючего, которое выброшено в воздушный поток и распылено им в мельчайшие капли. Возникший огонь может распространяться по такому следу со скоростью в десятки метров в секунду, так что никакие пожарные средства не сумеют подоспеть на помощь. В связи с этим возникла проблема введения в топливо веществ, существенно уменьшающих горючесть такого тумана. И такие работы ведутся.

С описанием тумана, этого иногда удивительно красивого, а чаще тревожного и загадочного природного явления, мы встречаемся и на страницах произведений художественной литературы. Здесь приведено несколько прозаических и стихотворных цитат, в которых описывается туман. Постарайтесь угадать, кто их авторы.

ТУМАНЪ м. (тьма, темень) густой парь, водяные пары въ низших слояхъ воздуха, на поверхности земли; омраченный парами воздухъ.

«Дитя, что ко мне ты так робко прильнул?» –

«Родимый, лесной царь в глаза мне сверкнул.

Он в темной короне, с густой бородой». –
«О нет, то белеет туман над водой».

Белая волокнистая пелена, затянувшая почти все болото, с каждой минутой приближалась к дому... Вот белесые кольца показались с обеих сторон дома и медленно слились в плотный вал, и верхний этаж с крышей всплыл над ним точно волшебный корабль на волнах призрачного моря.

Лишь высших гор до половины
Туманы покрывают скат,
Как бы воздушные руины
Волшебством созданных палат.

Внешность перемены была поразительна. Секунду назад мы мчались в ярких солнечных лучах, над нами было ясное небо, и далеко-далеко до самого горизонта море шумело и катило свои волны, а за ними бешено гнался корабль, изрыгая дым, пламя и чугунные ядра. И вдруг, во мгновение ока, солнце точно загасило, небо исчезло, даже верхушки мачт пропали из виду, и на глаза наши, словно их заволокло слезами, опустилась серая пелена. Сырая мгла стояла вокруг нас, как стена дождя. Волосы, одежда – все покрылось алмазными блестками.

Сегодня все вокруг заснуло,
Как дымкой твердь заволокло,
И в полумраке затонуло
Воды игривое стекло.

Какое-то странное, упоительное сияние примешалось к блеску месяца. Никогда еще не случалось ему видеть подобного. Серебряный туман пал на окрестность. Запах от цветущих яблонь и ночных цветов лился по всей земле.

Сентябрь холодный бушевал,
С деревьев ржавый лист валился,
День потухающий дымился,
Сходила ночь, туман вставал.

Туча кружево в роще связала,
Закурился пахучий туман.

Как грустна вечерняя земля!
Как таинственны туманы над болотами.

Ее глаза – как два тумана,
Полуулыбка, полуплач...

МОЖЕТ ЛИ БЕЛОЕ БЫТЬ ЧЕРНЕЕ ЧЕРНОГО?

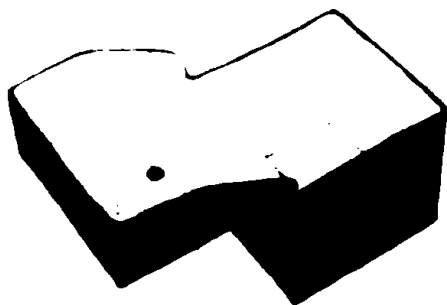
В.Майер

Начнем с совсем простого наблюдения. Положите рядом листки белой и черной бумаги и создайте в комнате полную темноту. Тогда ни одного листка вы не увидите, т.е. оба они будут одинаково черными.

Казалось бы, ни при каких условиях белая бумага не может быть чернее черной. И все же это не так. Попробуйте придумать и поставить опыт, в котором белое оказывается более черным, чем черное. Но прежде прочитайте следующий абзац.

Тело, которое при любой температуре полностью поглощает падающее на него излучение любой частоты, называется абсолютно черным. Понятно, что это – идеализация, в природе абсолютно черных тел нет. Тела, которые мы обычно называем черными (сажа, копоть, черный бархат, черная бумага и т.д.), на самом деле серые, т.е. они частично поглощают, а частично рассеивают падающий на них свет. Следовательно, для решения поставленной задачи можно, например, из белой бумаги сделать тело, более близкое к абсолютно черному, чем черная бумага. Теперь искомое решение почти очевидно.

Оказывается, вполне хорошей моделью абсолютно черного тела может служить сферическая полость с небольшим отверстием. Если диаметр отверстия не превышает $1/10$ диаметра полости, то (как показывает соответствующий расчет) вошедший в отверстие световой пучок сможет выйти из него обратно лишь после многократных рассеяний или отражений от разных точек стенки полости. Но при каждом «соприкосновении» пучка со стенкой энергия света частично поглощается, так что доля выходящего обратно из отверстия излучения ничтожно мала. Поэтому можно полагать, что отверстие полости практически полностью поглощает свет любой длины волны, как и абсолютно черное тело.



Конкретный прибор для опыта можно сделать, например, так. Из картона склейте коробку размером примерно $100 \times 100 \times 100$ мм с открывающейся крышкой. Изнутри коробку оклейте белой бумагой, а снаружи – покрасьте черной тушью, гуашью или, что еще

лучше, оклейте черной бумагой от фотопакетов. В крышке сделайте отверстие диаметром не более 10 мм.

Показывая опыт, осветите крышку коробки настольной лампой. Тогда отверстие будет выглядеть более черным, чем черная крышка. Откройте крышку, и все увидят, что за отверстием – белая бумага, которая в опыте действительно оказывается чернее черной!

Для того чтобы просто пронаблюдать явление, можно поступить еще проще (но менее интересно). Возьмите белую фарфоровую чашку и закройте ее бумажной черной крышкой с небольшим отверстием – эффект будет практически таким же.

ЖИДКИЙ АЗОТ И МЕДНАЯ ГАЙКА

В. Утешев

Однажды в лаборатории мы наблюдали, как вскипает жидкий азот вокруг упавшей в него медной гайки. Процесс кипения протекал очень интересно и совсем не так, как можно было бы ожидать. Жидкий азот начинал кипеть сразу после погружения в него гайки, но через несколько секунд, перед самым завершением, кипение вдруг резко усиливалось.

Понятно, что причиной кипения является большая разница начальных температур гайки и азота. Но возникает вопрос: почему охлаждение гайки происходит не монотонно, не плавно, как можно было предположить, а имеет два режима разной интенсивности, причем смена режимов происходит очень быстро (скачком)?

Любой процесс кипения всегда связан с передачей тепла. В нашем случае – от гайки к азоту. Поэтому ответ на вопрос о характере кипения можно найти, проанализировав механизм теплопередачи.

Как известно, тепло от одного тела к другому может передаваться разными способами, например с помощью теплопроводности или конвекции. При конвекции перенос тепла осуществляется путем перемещения и перемешивания больших масс вещества, нагретых до разных температур. В противоположность конвекции, при теплопроводности передача тепла не сопровождается перемещением вещества.

В природе конвективные явления встречаются буквально на каждом шагу. Иногда их стараются активно использовать, иногда, наоборот, от них хотят избавиться. Знаете ли вы, например, как устроено осиное гнездо? Это очень сложный лабиринт из множества листиков и различных пленок. Оказывается, такая конструкция максимально избавляет гнездо от конвективных потоков и тем самым хорошо сохраняет тепло. Прав-

да, можно сказать, что существует еще теплопроводность воздуха. Но она, как показывает опыт, играет ничтожную роль в теплопередаче (по сравнению с конвекцией).

В технике, прежде всего во всякого рода охлаждающих системах, конвекция чаще всего играет положительную роль, и ее всячески стараются усилить. В обычном автомобиле, например, именно для этого используется радиатор. При движении автомобиля возникает процесс искусственной воздушной конвекции – проникая через радиатор, движущиеся массы воздуха «снимают» тепло с нагретого двигателя.

Самые интенсивные конвективные явления на Земле происходят в атмосфере. Температура воздуха на различных высотах меняется в очень широких пределах. Более теплые области воздуха имеют меньшую плотность и поэтому поднимаются вверх, а более холодные, наоборот, опускаются, в результате чего происходит конвекция. Любопытно, что в невесомости разность температур различных воздушных областей не приводит к естественной конвекции, поэтому, например, свечка в космическом корабле не может гореть обычным способом. Она загорается и сразу же гаснет, так как нет конвективного подтока кислорода, необходимого для горения. Однако можно создать искусственную конвекцию, скажем, слегка дуть в сторону свечки, и таким образом поддерживать горение.

В физике для количественной характеристики процессов теплопередачи вводится специальная физическая величина – плотность потока тепловой энергии (тепла). Это энергия, проходящая через единицу площади за единицу времени. Для конвекции плотность потока тепла W непосредственно связана с плотностью потока вещества q , т.е. с массой вещества, проходящего через единицу площади за единицу времени: $W \sim q$. При теплопроводности переноса вещества нет, и плотность потока тепла определяется тем, как быстро изменяется температура тела от одного его участка к другому: $W \sim \Delta T / \Delta x$ (здесь T – температура, x – координата).

Теперь вернемся к случаю с гайкой и жидким азотом. Сначала объясним его теоретически.

Тепло в гайке распространяется по принципу обычной теплопроводности. В азоте же тепло передается с помощью конвекции за счет движущихся масс испарившегося азота. Но ни один из этих способов теплопередачи не объясняет оригинальный характер кипения жидкого азота. В чем же дело?

Оказывается, самое интересное происходит в месте контакта гайки с жидким азотом, где температура изменяется скачком. На

этом контакте плотность потока энергии можно представить в виде $W = \alpha \Delta T$, где α – некий эффективный коэффициент теплопередачи, а ΔT – тот самый скачок температур между азотом и гайкой. Описанным в начале статьи двум режимам кипения соответствуют различные значения α , и переход от одного значения к другому происходит скачком в тот момент, когда температура гайки достигает некоторого определенного значения.

Теперь попробуем разобраться в механизме этого интересного явления чуть подробнее.

При соприкосновении гайки, имеющей температуру 20°C (293 K), с жидким азотом при температуре -196°C (77 K) вокруг гайки создается «шуба» из газообразного азота. Этому процессу соответствует определенное значение плотности теплового потока от гайки к жидкому азоту. Когда гайка достаточно охладится и теплового потока не будет хватать для поддержания «шубы», «шуба» распадется (скачком) и сменится большим числом отдельных пузырьков газообразного азота. Теперь часть тепла будет уходить от гайки по-прежнему через газ, а часть – через жидкий азот, который проводит тепло лучше газообразного. Таким образом, здесь наблюдается некая парадоксальная ситуация, когда поток тепла увеличивается с уменьшением разности температур. И происходит это благодаря сильному скачку коэффициента α . (При возрастании потока «шуба» не образуется потому, что температура гайки уже достаточно упала.)

На рисунках 1 и 2 приведены графики зависимости плотности потока энергии W от скачка температур ΔT и от времени t . В

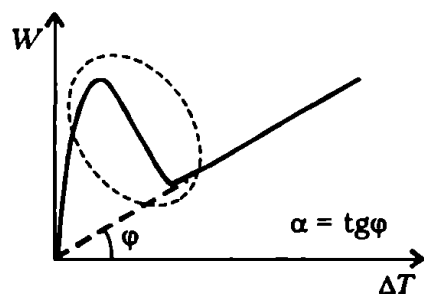


Рис. 1

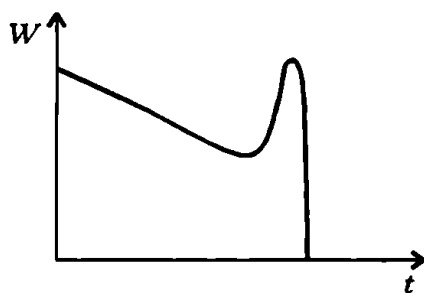


Рис. 2

обведенной области эффективный коэффициент теплопередачи α терпит скачок.

Заметим, что такое же необычное кипение в принципе можно наблюдать и с другими веществами. Например, вместо жидкого азота можно взять обычную воду и бросить в нее сильно нагретую

медную гайку. После погружения гайки в воду тоже образуется «шуба», но она распадается так быстро, что заметить смену режимов кипения практически невозможно. Различие в длительностях процесса кипения связано с различием в теплоемкостях. Вода по сравнению с жидким азотом имеет огромную теплоемкость и поэтому кипит значительно меньшее время.

Вместо медной гайки можно использовать и какое-нибудь другое нагретое тело. Медь же хороша тем, что имеет большую теплопроводность, вследствие чего гайка успевает остывать однородно по всему объему, создавая необходимые условия для образования «шубы».

Совершенно аналогичное явление смены режимов теплопередачи можно наблюдать, бросив несколько капель воды на раскаленную сковороду (или плиту). Если сковорода горячая, но ее температура все же не очень большая, капли, упав на поверхность сковороды, будут неподвижны и довольно быстро испарятся. Если же сковорода нагрета сильно, капли воды сразу после падения на ее поверхность соберутся в шарики, которые будут «бегать» по сковороде довольно долго. Это произойдет из-за того, что между сковородой и каплями возникнет паровая подушка (то же самое, что и «шуба» в случае с гайкой), которая затруднит теплопередачу от сковороды к капле и увеличит тем самым время жизни капли.

Итак, теплопередача – такое, казалось бы, простое и всем знакомое явление – на самом деле скрывает в себе большие возможности для наблюдения и исследования.

НЕОБЫЧНЫЙ МАЯТНИК

А.Агафонов, С.Селицер

Среди различных видов колебаний особое место занимают автоколебания. В механике типичным примером автоколебательной системы является маятник в часах. В электричестве широко известен ламповый генератор незатухающих колебаний.



Во многих книгах по физике можно встретить описание простой, но очень наглядной электромеханической автоколебательной системы. Предлагаем вам один из вариантов такой системы (рис.1). Ее легко изготовить в домашних условиях из подручных материалов.

Спиральная пружина 1 выполнена из алюминиевой проволоки диаметром 1,8 мм, диаметр витка 35—40 мм, а вся длина пружины примерно 140—180 мм. Ее можно намотать, используя стеклянный баллон обычной лампы дневного света. На нижнем конце пружины укреплен электрический контакт 2, выполненный из латуни; можно использовать также готовый контакт от какого-либо реле. Нижний контакт 3 сделан из латунной (или медной) фольги толщиной около 0,15 мм. Длину изогнутой (Г-образной) части этого контакта можно регулировать с помощью

Опубликовано в «Кванте» №11/12 за 1988 год.

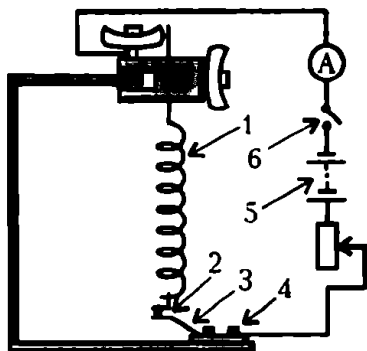


Рис. 1

болта 4, который зажимает латунную полоску (ее размеры в миллиметрах указаны на рисунке 2).

Источником тока 5 является батарея, составленная из девяти эле-

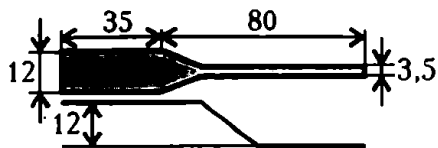


Рис. 2

ментов «Сириус-373», соединенных в три параллельные группы из трех последовательно соединенных элементов каждая. Батарея дает напряжение 4,5 В, а ток, текущий в цепи, составляет около 3 А. Вместо этой батареи можно использовать две аккумуляторные банки, соединенные последовательно.

Как же работает такой маятник?

В начальный момент ключ 6 разомкнут и контакт 2 касается контакта 3. При замыкании ключа по виткам пружины проходит ток, и действующая между витками сила Ампера заставляет их притягиваться друг к другу. В результате пружина сжимается, и цепь между контактами 2 и 3 разрывается. Теперь пружина начинает разжиматься, вновь замыкая цепь, и т.д. Таким образом происходят незатухающие колебания.

Как и в любой автоколебательной системе, здесь можно выделить следующие составные части:

- 1) постоянный источник энергии – батарея;
- 2) колеблющаяся система – пружина;
- 3) устройство, регулирующее поступление энергии в колеблющуюся систему, – пружина и контакты 2 и 3, замыкающие цепь;
- 4) обратная связь, т.е. механизм, приводимый в действие внешней силой и воздействующий на источник энергии, в данном случае осуществляется так: электрический ток (внешняя сила) порождает магнитное поле, которое вызывает сжатие пружины и размыкание цепи, а появляющаяся при этом сила упругости (внутренняя сила) снова замыкает цепь.

Следует отметить, что сила тяжести пружины существенной роли не играет, поэтому такая система будет функционировать и в невесомости. Поступление энергии в колебательную систему равно потерям энергии за счет трения, поэтому система будет совершать незатухающие колебания до тех пор, пока не иссякнет источник энергии.

КАК ЗАМЕТИТЬ НЕЗАМЕТНОЕ

В. Утешев

*В чертах его лица, что вечно строй меняли,
Вы нечто стойкое заметили едва ли.*

.....
*Пришлец загадочный, менял он стать свою
Быстрее догадок всех...*

Дж. Байрон. Видение суда

Что такое стробоскопия?

Представим себе деталь, вращающуюся в токарном станке. Пусть она освещается не солнечным, непрерывным, светом, а прерывисто, с помощью импульсной лампы-вспышки. Если частоту вращения детали f подобрать такой, чтобы выполнялось равенство $f = nv$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), где v — частота повторения вспышек света, то мы будем видеть только одну сторону детали, и нам будет казаться, что деталь вообще не вращается. Это происходит из-за того, что за время между двумя последовательными вспышками лампы, когда мы ничего не видим, деталь успевает сделать n полных оборотов, и мы опять видим ту же ее сторону.

Этот пример демонстрирует стробоскопический эффект. Если частота f немного отличается от nv , то нам будет казаться, что деталь медленно поворачивается от вспышки к вспышке. Легко понять, что деталь будет поворачиваться в сторону вращения, если $f > nv$, и в противоположную сторону, если $f < nv$.

Чудо двадцатого века — кино — полностью обязано своим существованием стробоскопическому эффекту. Происходит это следующим образом. Кинолента с отснятыми кадрами протягивается последовательными толчками мимо объектива кинопроектора со скоростью 24 кадра в секунду. Изображения, отснятые на двух соседних кадрах, мало отличаются один от другого, и благодаря инерции восприятия нашей зрительной системы нам

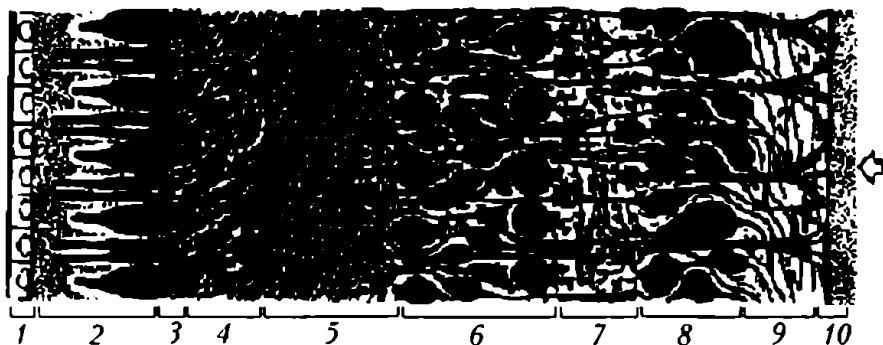
кажется, что отснятые картинки непрерывно движутся по экрану.

Теперь нам предстоит разобраться в «работе» нашей зрительной системы.

Немного физиологии

Лучи света от предмета, пройдя оптическую систему глаза, состоящую из выпуклой роговой оболочки, хрусталика и полужидкого прозрачного стекловидного тела, затем собираются на своеобразном экране глазной камеры – на сетчатке. Сетчатка представляет собой сложную структуру, состоящую из нескольких слоев нервных клеток.

На рисунке изображен схематичный поперечный разрез через сетчатку. Стрелка показывает направление света, падающего на сетчатку. Во внешнем слое 1, непосредственно примыкающем к



сосудистой оболочке, расположены клетки, окрашенные черным пигментом. Затем идут основные элементы зрительного восприятия 2, называемые (по внешнему виду) палочками и колбочками. Слои 3–5 соответствуют нервным волокнам, подходящим к палочкам и колбочкам. За этими слоями расположены так называемые зернистые слои 6 и 7, также связанные нервными волокнами. Слой 8 – это ганглиозные клетки, каждая из которых соединена с нервными волокнами, расположенными в слое 9. Слой 10 – внутренняя ограничивающая оболочка. Каждое нервное волокно оканчивается или колбочкой, или группой палочек. Мозаика этих клеточек на поверхности сетчатки далеко не равномерна.

В глазу человека насчитывается около 7 миллионов колбочек и около 130 миллионов палочек. Как показывают исследования, палочки более чувствительны к свету, чем колбочки, но зато колбочки способны к цветному зрению. В дальнейшем говоря «палочки», мы будем иметь в виду и палочки, и колбочки.

Свет, падая на светочувствительное вещество палочек – родопсин, вызывает его распад на ретинен и опсин. В результате этого происходит возбуждение одной палочки, и по зрительному нерву к головному мозгу бежит импульс возбуждения. А ретинен и опсин через цепь химических реакций превращаются в родопсин. Промежуток времени – около 0,2 с, – в течение которого происходит это восстановление, называют мертвым временем. Оно зависит прежде всего от интенсивности падающего света. В течение этого времени палочка находится в возбужденном состоянии и не способна реагировать на свет. В сетчатке все палочки «работают» независимо, мертвые времена у них не одинаковые, хотя и очень близкие, так что сетчатка в целом не имеет мертвого времени.

Инерция зрения, которая используется, в частности, в кино, проявляется в том, что зрительная система способна «запоминать» изображение на малое время – около 0,2 с. В течение этого времени она «помнит» предыдущий сигнал, но еще не способна воспринять следующий. Если между сигналами проходит интервал времени, меньший времени «запоминания», то последовательные изображения сливаются, и наблюдение кажется непрерывным. Вот почему темные промежутки между кадрами на киноэкране мы не различаем. Вообще зрительная система способна уверенно, без специальных ухищрений, почувствовать воздействие примерно 10 фотонов и зарегистрировать в темноте вспышку длительностью 0,000001 с.

Заметим, что смысловое «сшивание» изображений и вывод о том, что сменяющиеся изображения есть результат движения одного и того же объекта, осуществляются непосредственно в мозгу человека, и зрительная его система здесь никакой роли не играет.

Кроме того, что уже было сказано, глаз обладает еще многими удивительными качествами. Например, он способен сам создавать стробоскопический эффект. Расскажем немного об этом.

Удивительный «глазо-голосовой» эффект

Первое сообщение об этом интересном эффекте появилось в 1967 году. Эффект состоит в том, что оказывается возможным «остановить» вращающийся объект с помощью... голоса. Причем, если для обычной стробоскопии необходима лампа-вспышка, то для «глазо-голосовой стробоскопии» вполне подходит обычное солнце.

Идея эффекта состоит в следующем. Представим себе, что мы смотрим на бегущие сверху вниз черно-белые полосы. По сетчат-

ке нашего глаза побегут изображения этих полос. Теперь нужно заставить наш глаз совершать колебания в плоскости движения полос, причем такой амплитуды и частоты, чтобы на протяжении большей части периода вибрации глаза изображение полос на сетчатке оставалось неподвижным. При этих условиях и возникает иллюзия остановившихся полос.

Задать необходимые параметры вибрации глаза, оказывается, можно голосом. Колебания голосовых связок передаются через кости черепа глазу, и, выбирая громкость и тембр голоса, можно «останавливать» полосы. Вместо голоса можно использовать вибрации языка при выдохе и его биение о нёбо, но результат не будет достаточно эффективным. В принципе для этих целей можно использовать громкоговоритель, подключенный к генератору сигналов, мотор, частоту которого можно регулировать, или простой вибрирующий электромассажер. Прижав к нему голову, легко добиться искомого эффекта.

Описанным способом можно «останавливать» вращающиеся винты самолета, спицы велосипедного колеса, лопасти вентилятора и другие колеблющиеся или вращающиеся системы. Известно, что некоторым людям удавалось гудением вызывать появление полос и изменение качества изображения на экране телевизора. Правда, подобные эксперименты требуют терпения и сноровки и поэтому получаются далеко не у каждого.

И снова — обычная стробоскопия

Рассмотрим еще одно интересное проявление стробоскопии. Когда вы будете смотреть телевизор, попробуйте между экраном и глазами провести вверх — вниз указательным пальцем. Вы заметите возникновение замерших, «стоящих» пальцев. Причем эти пальцы при движении руки сверху вниз будут более широкими и светлыми, чем при движении руки снизу вверх. Почему так?

Изображение на экране телевизора возникает благодаря тому, что по люминесцирующему экрану постоянно сканирует слева направо и сверху вниз электронный луч, который как раз и формирует изображение. При попадании луча на какую-нибудь область экрана в этом месте возникает кратковременное свечение. Пробегая по экрану, электронный луч оставляет за собой светящиеся строки. Через мгновение эти строки затухают, поэтому можно говорить, что по экрану бегут светящиеся кадры. Когда мы смотрим на экран, мы не видим никаких миганий, обусловленных сканирующим лучом. Дело в том, что частота этих миганий очень большая — 50 раз в секунду, и темные

промежутки, возникающие на экране между кадрами, ускользают от нашего внимания.

Пусть палец движется мимо экрана так, что он затрачивает на прохождение перед экраном примерно 0,2 с. Это значит, что при частоте 50 кадров в секунду за 0,2 с по экрану пробегут 10 кадров. При этом, если движение пальца происходит сверху вниз, палец относительно кадров движется медленнее, чем при движении снизу вверх. Поэтому длительность освещения пальца кадром в этом случае больше, а значит, больше и длительность существования тени от пальца. Следовательно, в случае движения пальца сверху вниз тень более размазана по сетчатке, так что пальцы кажутся более широкими и светлыми. Регулируя скорость движения пальца, мы можем регулировать число отдельных бегущих кадров, освещающих палец, а значит, и число теней, образующихся от пальца на сетчатке глаза. Скорость пальца можно подобрать такой, что тени от пальца будут разрешаться глазом. Так, за 0,2 с по экрану сверху вниз проходят 10 кадров, и мы можем увидеть 10 замерших пальцев.

Стробоскопия и жизнь

В заключение отметим, что эффект стробоскопии успешно используется на практике, прежде всего там, где нужно измерять большие частоты колебаний или вращений. Его используют в неоновой рекламе для создания видимости движения, в электропроигрывателях для точного измерения частоты вращения пластинки, на эстраде для подчеркивания движения, и, как уже говорилось, на этом эффекте основаны кино и телевидение.

Однако возможны и более оригинальные проекты использования стробоскопического эффекта. Представьте себе, например, что вдоль стен тоннеля метрополитена размещается длинный экран с рисунками. При движении поезда с определенной скоростью (и, возможно, с использованием импульсной подсветки) эти картинки могут «ожить», а пассажиры поезда, глядя в окно, смогут смотреть мультфильмы или рекламные ролики!

ЗЕЛЕНый ТУМАН

В. Майер

Вы когда-нибудь видели зеленый туман? Нет? Не огорчайтесь, это вполне поправимо. Сейчас вы увидите сами и покажете вашим товарищам не только зеленый, но и голубой, и красный, и вообще — разноцветный туман.

Демонстрационный опыт

Удобнее всего опыт проводить в школьном физическом кабинете на демонстрационном столе. Для опыта вам понадобится прежде всего источник света. Это может быть, например, автомобильная лампочка, рассчитанная на рабочее напряжение 6 В, или школьный осветитель для теневого проецирования (нужно только придвинуть его лампочку вплотную к собирающей линзе осветителя или линзу убрать совсем). Подойдет и любой другой источник света, лишь бы он имел небольшие размеры и не слишком ярко освещал находящиеся рядом предметы. Проще всего этого добиться, разместив источник за отверстием в большом черном экране.

Итак, установите лампочку 1 и на расстоянии 20 — 40 см от нее расположите стеклянную бутылку 2 емкостью 20 л (рис. 1). (Такие бутылки диаметром примерно 25 см и высотой около 45 см с горлышком, имеющим отверстие диаметром 3,5 — 4,5 см, продаются в хозяйственных магазинах.) Бутылку нужно тщательно вымыть, непосредственно перед опытом ополоснуть холодной водой и внешнюю поверхность насухо протереть.

На стенках бутылки ни снаружи, ни внутри не должно оставаться капель воды.

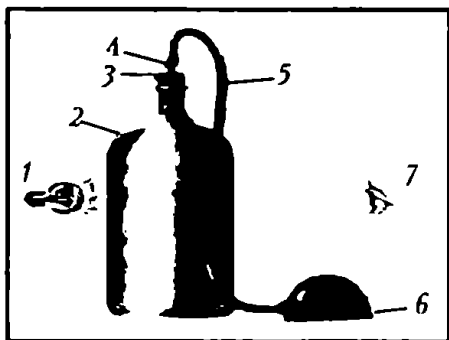


Рис. 1

Опубликовано в «Кванте» №4 за 1990 год.

Бутыль закройте резиновой пробкой 3, сквозь отверстие которой пропущена стеклянная или металлическая трубка 4. Трубку резиновым шлангом 5 соедините с нагнетающим насосом 6. На рисунке показано также положение глаза наблюдателя 7, расстояние от которого до бутылки может быть от 1 до 6 м.

Включите лампочку, в кабинете создайте темноту или полумрак и накачайте в бутылку воздух. Попросите зрителей внимательно смотреть на лампочку и после небольшой паузы быстро выньте из горлышка бутылки пробку. Тотчас же вокруг лампочки, в пределах размеров бутылки, можно будет увидеть широкие и довольно яркие разноцветные кольца.

Что происходит в бутылке?

Вы накачиваете воздух, и давление в бутылке повышается. Когда вы делаете паузу, температура воздуха в бутылке становится комнатной. На дне бутылки имеется немного оставшейся после ополаскивания воды, а на стенках – тонкая водяная пленка. Поэтому помимо воздуха в бутылке находится насыщенный водяной пар. Вы выдергиваете пробку, и сжатый в бутылке воздух быстро расширяется. При этом, так как процесс близок к адиабатическому (т.е. происходит без теплообмена с окружающей средой), температура воздуха в бутылке понижается, пар становится пересыщенным и легко конденсируется в капельки воды на пылинках, которых всегда так много в воздухе.

Таким образом в бутылке образуется туман. Вы его без труда обнаружите, если посмотрите на бутылку сбоку: в момент возникновения тумана идущий от лампочки световой пучок за счет рассеяния становится видимым. Сразу бросается в глаза, что туман в бутылке довольно редкий. Это свидетельствует о том, что, несмотря на значительную, по нашим субъективным оценкам, запыленность воздуха, пылинок, как центров конденсации водяного пара в бутылке, сравнительно мало.

Почему возникают кольца?

В заполняющем бутылку воздухе плавают составляющие туман сферические капельки воды. Они прозрачны, значит, свет может преломляться в них, и они достаточно малы, следовательно, свет может дифрагировать на них. И преломление, и дифракция света в принципе могут дать разноцветные кольца. Какое же явление ответственно за результаты наших опытов?

Преломлением и отражением света в сферических каплях воды объясняется радуга. Но наблюдать радугу можно лишь под вполне определенными углами. Кроме того, радуга, в

первом приближении, не зависит от размеров капель. В проведенных же нами опытах диаметры колец непрерывно изменялись, а это можно объяснить только изменением размеров капель тумана. Наконец, хорошая яркая радуга получается на крупных каплях воды диаметром 1—2 мм, а таких капель в бутылки заведомо нет.

Итак, мы заключаем, что наблюдаемые в описанных опытах разноцветные кольца обусловлены, скорее всего, дифракцией света на мелких каплях воды.

А что говорит литература?

Не может быть, чтобы дифракция света на множестве мелких круглых одинаковых частичек никогда раньше не обсуждалась в журнале. И действительно, полистав подшивки старых номеров «Кванта», вы обнаружите несколько соответствующих материалов. Так, в 1977 году Н.Ростовцев в статье «Как с помощью проволоки измерить длину световой волны» описал интересные опыты по дифракции света на сплюсненном клубке тонкой проволоки, на множестве частичек ликоподия и даже на эритроцитах крови. Спустя пять лет Я.Амстиславский в статье «Необычные явления вокруг обычных источников света» вновь вернулся к этим явлениям, но описал их с несколько иных позиций. Прочитав эти статьи, вы узнаете, что разноцветные кольца вокруг источника белого света называются венцами и часто наблюдаются в естественных условиях.

Очень много и интересно о венцах рассказывается в книге М.Миннарта «Свет и цвет в природе» (М.: Наука, 1969). В ней, кроме того, очень удачно сформулированы основные положения теории:

«а) Дифракция на сравнительно плотном облаке, состоящем из водяных капель одинаковой величины, происходит так же, как на одной капле, лишь интенсивность дифрагировавшего света больше.

б) Дифракция на капле происходит так же, как на малом отверстии в экране...

в) Дифракция на отверстии рассчитывается согласно принципу Гюйгенса: принимается, что каждая точка отверстия излучает световые волны, и определяется, как интерферируют эти волны от всех частей отверстия, приходя в глаз».

Что касается количественных расчетов, их вы можете найти в упомянутых статьях, а также в статье Е.Городецкого «Дифракция света на круглом отверстии» («Квант», 1989). Нелишне, впрочем, напомнить, что чем меньшие размеры имеют препят-

ствия, тем большими размерами при прочих равных условиях обладают соответствующие дифракционные картины.

Вообще о венцах написано немало. Удивительно, однако, что изумительные по красоте и простоте опыты с искусственным туманом даже не упоминаются! Лишь предприняв специальные поиски, мы, наконец, обнаружили в книге П. Броунова «Атмосферная оптика» (М.: Гостехиздат, 1924) изложение экспериментов с искусственным туманом, выполненных еще в конце прошлого века.

Еще один способ наблюдения венцов

Предложенный вам демонстрационный опыт получается всегда, но яркость, контрастность, размер и длительность существования венцов от опыта к опыту меняются довольно значительно. Надо бы исследовать явление подробнее, но изображенная на рисунке 1 установка не позволяет сделать это.

В самом деле, она рассчитана на то, что опыт осуществляют минимум два человека: один создает условия эксперимента, другой проводит наблюдения. Это, конечно, крайне неудобно. Кроме того, трудно обеспечить даже примерное равенство условий опыта либо более или менее надежно проконтролировать их изменения. Наконец, частые накачивания воздуха насосом утомительны чисто физически и отвлекают от основного. Поэтому желательна другая установка, свободная от перечисленных и иных недостатков.

Основной элемент рекомендуемой установки изображен на рисунке 2. Стекло́нная колба 1 емкостью 0,5 л закрыта резиновой пробкой 2 со стекло́нной трубкой 3, на которую надета резиновая груша 4 диаметром около 8 см.

Вы, безусловно, и сами догадались, что в исследованиях целесообразно использовать небольшой сосуд, а насос заменить подходящим устройством, позволяющим без особых сложностей изменять давление газа в этом сосуде. Несомненно, вы уже хорошо представляете и порядок проведения опытов, но все же изложим его.

Колба должна быть чистой, снаружи сухой и без капель воды на стенках, которые так мешают наблюдениям. Перед опытами колбу ополосните хо-

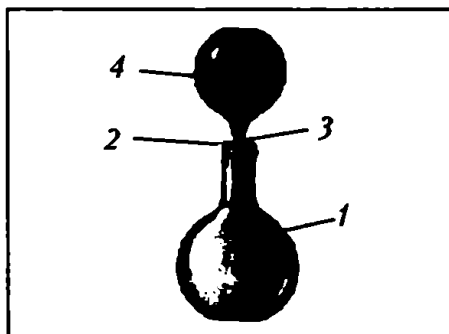


Рис. 2

лодной водой из-под крана. Небольшой источник света поместите на расстоянии 1 – 3 м от глаза. Перед глазом на подходящей по высоте подставке поставьте колбу и закройте ее резиновой пробкой с грушей. Теперь нажмите на грушу, сделайте небольшую паузу и, отпустив грушу, наблюдайте разноцветные венцы вокруг источника. При проведении опытов колбу лучше держать двумя пальцами вблизи пробки, чтобы зря не нагревать ее и не оставлять отпечатков пальцев на стенках.

Собрав установку, получите венцы вокруг источника света. Медленно сжимайте и отпускайте грушу. При этом венцы сначала увеличиваются, а затем уменьшаются. Полученный результат можно объяснить только тем, что при увеличении давления капельки тумана становятся меньше, а при уменьшении – больше. Это вполне естественно, так как с адиабатическим ростом давления температура газа в колбе повышается и вода испаряется из капелек, а по мере снижения давления – конденсируется в них. Повторите опыт снова и снова. Вы увидите, что яркость и размеры дифракционной картины постепенно уменьшаются. Примерно через две минуты венцы исчезают совсем и не появляются, сколько бы вы ни нажимали на грушу. Попробуем объяснить это.

Мы уже говорили, что уменьшение размеров картины вызвано ростом диаметра капелек тумана. Яркость же картины может снижаться только потому, что уменьшается общее число капелек тумана в колбе. Но почему это происходит? Может быть, капельки испаряются? Если на мгновение допустить это невероятное предположение, то сразу обнаруживается противоречие: при испарении капельки должны уменьшаться, а дифракционная картина – увеличиваться, но все происходит как раз наоборот. Остается наиболее естественное объяснение – водяные капельки просто оседают на дно колбы. И действительно, капельки воды конденсируются на пылинках и, оседая на дно колбы, увлекают их за собой. Воздух в колбе становится все чище, центров конденсации остается все меньше, значит, капельки тумана образуются все более крупными и редкими, вследствие чего картина постепенно уменьшается и теряет яркость.

Понятно, что способность колбы давать венцы можно восстановить, если в нее ввести взвешенную в воздухе пыль. Сделайте, например, так. Откройте колбу, приблизьте конец стеклянной трубки, торчащий из пробки, к горлышку колбы и несколько раз сожмите и отпустите грушу. Тем самым вы продуете колбу комнатным воздухом, который всегда несколько запылен, и сможете снова с успехом повторять опыты по образованию венцов.

Попробуйте вводить в колбу разные «сорта» пыли, набирая ее в резиновую грушу с корешков книг, долго простоявших на полке, с ворсистой одежды и т. д. Проследите за соответствующими изменениями дифракционной картины и убедитесь в том, что пыль не позволяет существенно увеличить число центров конденсации пара в колбе. А что если воспользоваться дымом?

Напустите в колбу немного дыма от тлеющего на конце проволоки клочка ваты. Сжав и отпустив грушу, вы получите густой белый туман, сквозь который ничего хорошего не видно. Он появляется потому, что частицы дыма весьма многочисленны, на каждой из них конденсируется водяной пар, и в результате образуется очень много очень мелких капелек воды.

Попробуйте теперь уменьшать количество центров конденсации пара. Для этого откройте колбу и продуйте ее воздухом. Закрыв колбу пробкой с резиновой грушей, вновь получите туман в ней. Повторяя эти операции, проводите наблюдения. Вы обнаружите, что по мере уменьшения центров конденсации пара в колбе у наблюдаемого в опыте белого круга с центром в источнике света появляется красноватая или, скорее, коричневатая кайма. Постепенно белый круг желтеет, а кайма формируется в коричневато-красное кольцо. Затем это кольцо становится красным, а за ним появляется синее. С каждым разом картина становится все более яркой, и в ней появляются новые цвета: малиновый, зеленовато-голубой, сиреневый ...

Напомним, что все эти явления обусловлены постепенным увеличением диаметра капелек тумана. В некоторый момент, глядя с расстояния вытянутой руки на колбу, вы вдруг заметите, что вся она почти равномерно окрашена в определенный яркий и насыщенный цвет. Это непривычное и чрезвычайно красивое явление можно объяснить интерференцией света, сфокусированного каплями и дифрагированного на них. При дальнейшем увеличении диаметра капелек тумана возникают широкие венцы.

Заключение

Вот и окончен рассказ о разноцветном тумане. Конечно, надо было бы упомянуть о роли ионов, которые легко получить в колбе с помощью пьезоэлектрической зажигалки. Хорошо бы рассказать о дифракционной картине в монохроматическом свете. Любопытно подробнее рассмотреть динамику явления. Было бы совсем неплохо немного посчитать.

Но все это мы вам предлагаем сделать самостоятельно.

В.Креймер

Проделайте такой опыт. Встаньте перед включенным телевизором на расстоянии 1,5–2 м и посмотрите на колеблющиеся ножки вертикально расположенного пинцета. На фоне экрана вы увидите, что ножки волнообразно искривлены (рис.1). Меняя расстояние между глазом и пинцетом, можно добиться наиболее четкого эффекта. Очевидно, конечно, что искривление пинцета – чисто оптический эффект, ибо из-за большой жесткости ножек они так изгибаться не могут. Достаточно пинцет расположить горизонтально, и вы увидите, что при колебаниях его ножки остаются прямолинейными.

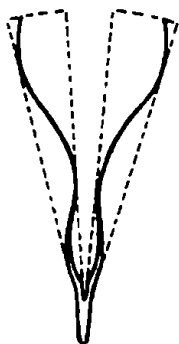


Рис. 1

Чтобы понять этот опыт, сначала разберем более простой случай.

Возьмите карандаш, поставьте его вертикально и начните быстро перемещать в горизонтальном направлении вдоль экрана. Карандаш будет казаться наклоненным в сторону, противоположную направлению движения. Почему? Оказывается, все дело тут в стробоскопическом эффекте. Луч, пробегая по экрану слева направо и сверху вниз, высвечивает в каждый момент времени лишь какой-то участок экрана. Поэтому весь карандаш сразу освещен быть не может – каждый раз освещенной будет только его малая часть.

Пусть в некоторый момент времени луч осветил участок карандаша, близкий к точке a (рис.2). Наш глаз запомнит этот освещенный участок примерно на 0,2 с. Находясь на следующей строке, луч осветит карандаш в точке b , смещенной относительно точки a на расстояние s . Этот путь карандаш пройдет за то время, пока луч пробежит расстояние от a до b , равное $l_c \pm s$, где l_c – длина строки, знак « \pm » соответствует движению карандаша

Опубликовано в «Кванте» №6 за 1990 год. (Тогда автор этой статьи учился в 11 классе ФМШ 35 г. Донецка.)

вправо, а $\leftarrow \rightarrow$ — влево. Аналогичное смещение произойдет и с другими участками карандаша. После «склеивания» всех видимых участков карандаша он покажется нам как бы наклоненным. Угол наклона к горизонту будет равен

$$\alpha = \arctg \frac{l_k(v_{\text{л}} + v_k)}{(N-1)l_c(\pm v_k)},$$

где l_k — длина карандаша, v_k — скорость движения карандаша (положительное значение скорости соответствует движению вправо), $v_{\text{л}}$ — скорость луча, N — количество строк, уместяющихся на проекции карандаша. Из этой формулы видно, что угол наклона карандаша уменьшается с ростом скорости карандаша и существенно зависит от направления его движения. Таким образом, луч телевизора, освещая различные участки карандаша в различные моменты его поступательного движения, позволяет одновременно увидеть различные фазы движения карандаша, т.е. осуществляет развертку его движения во времени.

А теперь вернемся к опыту с пинцетом. При частоте колебаний порядка 10^2 Гц пинцет за то время, пока луч пройдет длину его проекции на экране, успевает сделать несколько колебаний. Благодаря развертке во времени, на фоне экрана будут одновременно видны различные фазы поперечных колебаний пинцета. Мгновенная скорость движения каждой его точки зависит от времени по синусоидальному закону, поэтому видимые волны на ножках пинцета тоже близки к синусоидальным, а искажения вызваны лишь изменением знака скорости при смене направления движения (см. выражение для угла α , приведенное выше). Интересно, что волны на ножках пинцета могут стоять на месте или перемещаться — в зависимости от соотношения между частотой колебаний пинцета и частотой кадровой развертки телевизора (50 Гц).

В заключение советуем вам провести аналогичные опыты с камертоном или с натянутой струной. В последнем случае эффект будет особенно четким и наглядным.

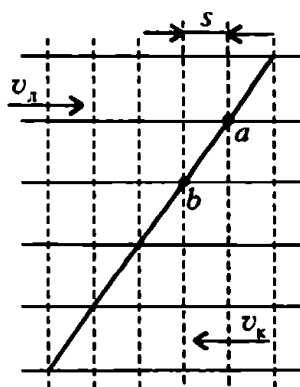


Рис. 2

ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»

ВЫПУСК 1

Составители *В.А.Тихомирова, А.И.Чернуцан*

Редактор *А.Ю.Котова*

Литературный редактор *Л.В.Кардасевич*

Технический редактор *Е.В.Морозова*

Компьютерная группа

Е.А.Митченко, Л.В.Калиничева

ИБ № 44

Формат 84×108 1/32. **Бум.** офс. нейтр. **Гарнитура** кудряшевская.

Печать офсетная. **Усл. печ. л.** 6,72.

Заказ 1102.

117296 Москва, Ленинский пр., 64-А,

«Квант»

Отпечатано на Ордена Трудового Красного Знамени

ГУП Чеховский полиграфический комбинат

**Министерства Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и
средств массовых коммуникаций**

142300, г.Чехов Московской области

Тел. (272) 71-336. Факс (272) 62-536