

291  
Приложение к журналу

# КВАНТ

№4/2002

ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»

*Выпуск 2*

Бюро



Квантум

**ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»**

*Выпуск 2*

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



---

Москва 2002  
Бюро Квантум

УДК 53(076.5)  
ББК 22.3  
Л12

Приложение  
к журналу «Квант»  
№4/2002

**Л12 Лаборатория «Кванта». Выпуск 2 / Составители  
В.А.Тихомирова, А.И.Черноуцан — М.: Бюро Квантум,  
2002. — 128 с. — (Прил. к журналу «Квант» №4/2002)  
ISBN 5-85843-039-2**

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

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

ББК 22.3

ISBN 5-85843-039-2

© Бюро Квантум  
«Квант», 2002

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
Как вырастить кристалл... <i>М.Кля</i> .....	5
Не верь глазам своим... <i>Г.Косоуров</i> .....	8
Оранжевое небо. <i>Г.Косоуров</i> .....	12
Волны в мелкой тарелке. <i>А.Косоуров</i> .....	16
Станный маятник. <i>Н.Минц</i> .....	22
Четыре опыта со зрением. <i>Дж.Грегг</i> .....	26
Искусственные миражи. <i>Р.Вуд</i> .....	31
Снежные кристаллы. <i>А.Варпаховский, А.Виленкин</i> .....	36
Фигуры Лиссажу. <i>Н.Силаева</i> .....	42
Борный люминофор. <i>В.Майер</i> .....	48
Выращивание кристаллов. <i>А.Варламов, Д.Казаковцев</i> .....	50
Игрушки из кристаллов. <i>М.Головей, Г.Добржанский</i> .....	53
«Грибы» под лампочкой и... война в заливе. <i>Б.Бубнов</i> .....	57
Опыты с вращающейся жидкостью. <i>Н.Бурлаки</i> .....	61
Шарик с дыркой в струе пылесоса. <i>С.Кузьмин</i> .....	68
Простые опыты с переменным током. <i>Н.Паравян</i> .....	72
Физика в ложке воды. <i>И.Воробьев</i> .....	76
Замерзающая лужа. <i>А.Миранский, А.Шапиро</i> .....	81
Осмоз и... вечный двигатель. <i>Н.Паравян</i> .....	85
Несколько слов о мираже. <i>А.Митрофанов</i> .....	87
Точка Кюри. <i>Н.Паравян</i> .....	89
Станные тени и отражения. <i>А.Митрофанов</i> .....	91
Пузыри и вихри в кипящей жидкости. <i>Т.Полякова, В.Заблоцкий,</i> <i>О.Цыганенко</i> .....	93
Можно ли увидеть магнитное поле? <i>А.Митрофанов</i> .....	100
Куда дует ветер? <i>А.Митрофанов</i> .....	106
Волшебная линза. <i>А.Митрофанов</i> .....	108
Капельки росы, стеклянные шарики и микроскоп Левенгука. <i>А.Митрофанов</i> .....	112
Муаровые узоры. <i>А.Митрофанов</i> .....	116
Про мороженое. <i>Н.Елисеев</i> .....	119
Почему вращается вертушка? <i>А.Карачи, Д.Кузовкин, В.Сухомесов,</i> <i>С.Тодышев</i> .....	121
Домашний термоэлектрогенератор. <i>В.Ланге</i> .....	125

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Готовя каждый номер журнала «Квант» или Приложения к нему, редакционная коллегия старается подбирать материалы так, чтобы читатели разного уровня подготовки и с разными интересами всегда могли найти для себя что-нибудь полезное. Вот почему 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 «Кванта».

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 только эксперимент может и должен проверить выводы, полученные из теоретических расчетов и рассуждений.

В этой книге собраны статьи, опубликованные в журнале «Квант» в основном в рубрике «Лаборатория «Кванта» в 70-е и 90-е годы теперь уже прошлого века.

# КАК ВЫРАСТИТЬ КРИСТАЛЛ

*М.Клиа*

Современная промышленность не может обойтись без самых разнообразных кристаллов. Они используются в часах, транзисторных приемниках, вычислительных машинах, лазерах и многом другом. Великая лаборатория — Природа — уже не может удовлетворить спрос развивающейся техники, и вот на специальных фабриках выращивают искусственные кристаллы: маленькие, почти незаметные, и большие — массой в несколько килограмм.

Существуют различные способы выращивания кристаллов. Часто этот процесс требует высоких температур и огромных давлений (например, для получения искусственных алмазов), но некоторые кристаллы можно выращивать даже в домашних условиях. Мы расскажем вам о том, как это можно делать.

Проще всего дома выращивать кристаллы алюмокалиевых квасцов —  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Вещество это можно купить в любом магазине химреактивов, и оно абсолютно безвредно (квасцы иногда даже добавляют в питьевую воду, чтобы очистить ее от мути). Но прежде чем приступить к работе, давайте обсудим, что представляет собой процесс выращивания кристаллов.



---

Опубликовано в «Кванте» №5 за 1970 год.

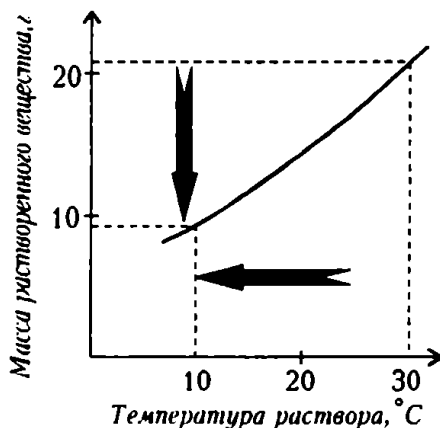


Рис. 1

при одной температуре, становится недосыщенным при более высокой температуре. Если же насыщенный раствор охладить, избыток вещества выпадает в осадок. На рисунке 1 показана зависимость растворимости алюмокалиевых квасцов от температуры. Из графика видно, что, например, при охлаждении до 10 °C раствора, который был насыщенным при 30 °C, в осадок должно выпасть более 10 г вещества. Следовательно, один способ выращивания кристаллов заключается в том, чтобы дать насыщенному раствору охладиться.

Можно выращивать кристаллы и выпариванием. Ведь если насыщенный раствор испаряется, объем его уменьшается, а количество растворенного вещества остается прежним. Иначе говоря, опять создается избыток вещества, который выпадает в осадок.

Рассмотрим теперь, как происходит выделение избытка вещества.

Возьмем насыщенный раствор и нагреем его. Сосуд с полученным недосыщенным раствором накроем стеклом и дадим раствору спокойно охладиться до температуры более низкой, чем температура насыщения. При этом осадок может и не выпасть, и мы получим пересыщенный раствор. Дело в том, что для образования кристалла необходима «затравка». Ею может служить маленький кристаллик того же вещества или просто пылинка. Иногда достаточно качнуть сосуд с пересыщенным раствором или снять прикрывающее его стекло, как начинается мгновенная кристаллизация. При этом обычно образуется множество мелких кристалликов. Для того чтобы вырастить крупный кристалл, необходимо ограничить число «затравок». Лучше всего внести искусственную «затравку», роль которой может исполнять один из кристалликов, полученных ранее.

«Затравка» готовится следующим образом. Возьмите две стеклянные банки и тщательно их вымойте. В одну из них налейте теплую воду и насыпьте квасцы. Помешивая раствор, следите за растворением. Когда вещество перестанет растворяться, аккуратно слейте раствор во вторую банку так, чтобы туда не попало нерастворившееся вещество. Затем накройте банку стеклом. Когда раствор охладится, снимите стекло. Через некоторое время вы увидите, как в банке образуется множество кристалликов. Дайте им подрасти и отберите самые крупные для «затравок». Теперь можно приступать к выращиванию кристалла. Но прежде нужно приготовить посуду. Чтобы уничтожить нежелательные зародыши на стенках, пропарьте банки изнутри над носиком кипящего чайника. Затем сделайте снова теплый насыщенный раствор и слейте его в другую чистую банку.

Итак, у вас есть теплый насыщенный раствор квасцов. Нагрейте его еще немного, накройте банку стеклом и поставьте охлаждаться. Когда температура раствора приблизится к температуре насыщения, опустите в банку приготовленную ранее «затравку». Поскольку раствор еще недосыщен, «затравочный» кристаллик начнет растворяться. Но как только раствор охладится до температуры насыщения, растворение кристаллика прекратится, а вскоре начнется его рост. (Если кристаллик растворится целиком, можно ввести в раствор новую «затравку».) Когда раствор перестанет охлаждаться, выращивание кристалла можно продолжить. Для этого приподнимите стекло так, чтобы вода испарялась, но пылинки в раствор не попадали. Рост кристалла продолжается два-три дня. Выращивая кристалл, старайтесь банку не трогать и не передвигать. Когда кристалл будет готов, аккуратно достаньте его из раствора и тщательно промокните бумажной салфеткой, иначе он быстро потускнеет.

Кристаллы получают разными по форме в зависимости от того, бросите ли вы «затравку» на дно сосуда или подвесите ее на нитке (рис.2). Вторым способом можно, например, вырастить «бусы». Для этого надо «затравить» нитку, т.е. провести ею несколько раз по кристаллу, а затем опустить нитку в раствор.

Выращивание кристаллов — это искусство. Возможно, у вас не все сразу получится. Не огорчайтесь. Немного настойчивости, упорства, аккуратности, и вы станете обладателями красивых кристаллов.

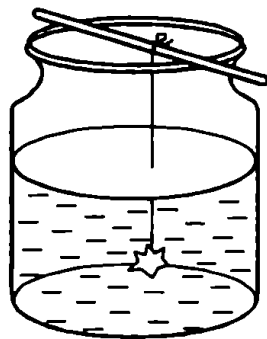


Рис. 2

*Г. Косоуров*

Для человека зрение – основной источник информации об окружающем его мире. Мы привыкли абсолютно доверять глазам. Слова «не поверил глазам своим» означают крайнюю степень удивления. В привычных условиях такое доверие вполне оправдано. Глаза вместе с соответствующими отделами мозга составляют тончайший аналитический аппарат, безотказно служащий нам в самых разнообразных условиях: при ярком солнечном свете и когда света совсем мало, в покое и при быстром движении. Изображение, которое получается на сетчатке глаза, представляется нам лишенным каких-либо недостатков. Оно вполне резкое, перспектива правильная, прямые линии представляются прямыми, вокруг предметов нет радужной окраски (хроматической аберрации). Но не следует думать, что наш глаз действительно является идеальным инструментом. Объективные исследования показывают, что глазу свойственны все недостатки линз. Но наше сознание из несовершенного изображения на сетчатке глаза воссоздает правильное представление об окружающем нас пространстве.

Приведем такой пример. Человек, у которого появилась близорукость, впервые надел очки. Первое время он видит перспективу сильно искаженной. Прямые линии представляются ему искривленными, плоскости – кривыми и покатыми. Иногда это вызывает даже легкое головокружение. Но проходит некоторое время, и человек сквозь очки начинает правильно воспринимать и перспективу и прямолинейность. Мир снова предстает перед его взором в правильном, неискаженном виде, хотя изображение на сетчатке по-прежнему искажено.

В необычных условиях, когда глаза получают противоречивую информацию, когда велики контрасты, когда правильная оценка расстояний, размеров, соотношений затруднена или когда отдельные участки сетчатки утомлены продолжительным

---

Опубликовано в «Кванте» №10 за 1970 год.

воздействием какого-либо раздражителя, наше сознание начинает ошибаться. Возникают различные обманы зрения. Вы, безусловно, сами не раз встречались с различными примерами таких любопытных иллюзий. Мы приведем описание нескольких опытов, показывающих, как ошибаются наши глаза. Делаем мы это не с целью подорвать ваше доверие к зрению, а для того чтобы показать, какую большую роль в формировании образов играет синтетическая работа мозга.

Для первого опыта, который обычно выдают за доказательство того, что на сетчатке, как и в фотоаппарате, получается перевернутое изображение, необходимы два кусочка картона, например две открытки. В одной из них проколите толстой иглой отверстие диаметром около 0,5 мм и держите его перед глазом на расстоянии 2 – 3 см, глядя на освещенный пейзаж, светлое небо или лампу. Краем второй открытки перекрывайте постепенно зрачок перед самым глазом, вдвигая открытку снизу. В поле зрения глаза вы увидите тень края открытки, опускающуюся сверху.

Разберем оптическую схему этого опыта подробнее (рис. 1). Пока перед глазом нет открытки с отверстием, все точки поля зрения посылают в глаз лучи через весь зрачок, и от каждой точки зрачка свет распределяется по всей сетчатке. Если поставить перед глазом открытку с отверстием, каждая точка поля зрения будет изображаться лучами, проходящими через небольшую часть зрачка. Верхние точки поля зрения изображаются лучами, проходящими через нижнюю часть зрачка, нижние точки – через верхнюю. Закрывая краем открытки нижнюю часть зрачка, мы затемняем верхнюю часть поля зрения и видим край открытки, опускающийся сверху. Легко понять, что этот эффектный опыт никак не зависит от хода лучей в глазу и не может служить доказательством перевернутости изображения на сетчатке. Поле зрения уже сформировано до зрачка. В этом легко убедиться, поместив на место глаза матовое стекло.

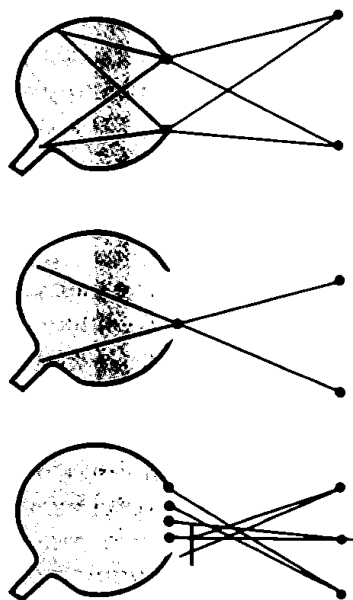


Рис. 1

Второй опыт показывает, как справляется зрение с противоречивой информацией. Сверните из листа бумаги трубку диамет-

ром около 2 см и смотрите через нее одним глазом на расположенные впереди предметы. Перед вторым глазом поместите ладонь руки, держа ее на расстоянии 10 – 15 см перед лицом, вплотную к трубке. Вы отчетливо увидите дыру в вашей ладони, сквозь которую видны окружающие предметы. Изображение средней части ладони полностью подавлено изображением, которое видит глаз через трубку.

Более тонкий опыт с разной информацией для правого и левого глаза можно провести так. Подвесьте на белой нитке какой-нибудь небольшой светлый предмет. Раскачав получившийся маятник в одной плоскости, смотрите на него с расстояния 2 – 3 м. Поместите перед одним глазом светофильтр средней плотности любого цвета. Вы увидите, что маятник колеблется не в одной плоскости, а как бы описывает эллипс. Переместите светофильтр к другому глазу, и направление движения маятника по эллипсу изменится на обратное.

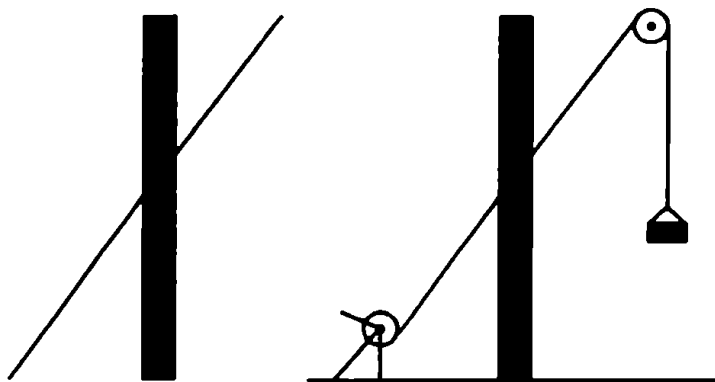
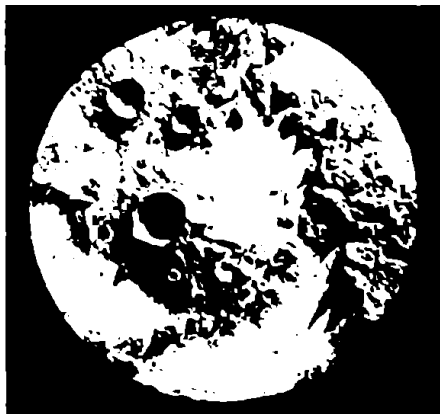


Рис. 2

Следующий опыт иллюстрирует рисунок 2. Слева показана известная иллюзия излома прямой, пересекающей черную полосу. Но мало кто знает, что достаточно дополнить рисунок лебедкой и поднимаемым грузом (см. правую часть рисунка), подсказав тем самым сознанию, что прямая – это натянутый трос, и иллюзия излома исчезнет.

Еще один опыт связан с ситуацией, когда для интерпретации образа сознанию предоставляется возможность выбора. На рисунке 3 даны две фотографии части лунного пейзажа в районе Моря Дождей и горного хребта Апеннин. На одной из них вы видите лунные кольцевые горы, а на другой видны кольцевые овраги – рельеф вывернулся. Переверните рисунок, и обращение рельефа произойдет на другой фотографии. Обратите внимание,



*Рис. 3*

что эти фотографии совершенно одинаковы, но одна из них перевернута.

Эффект обращения рельефа часто возникает при наблюдении Луны в телескоп. Космонавты, побывавшие на Луне, столкнулись с реальной трудностью правильного восприятия местности, лишенной воздушной перспективы в условиях большой контрастности пейзажа. Эффекты обращения направления движения можно наблюдать, глядя на силуэт вращающейся антенны радиолокатора. Вам будет казаться, что антенна в некоторые моменты внезапно меняет направление вращения. Раньше это явление рекомендовалось наблюдать на силуэте ветряной мельницы.

Много различных интересных иллюзий связано со зрением. Однако обманы зрения – это не просто занятные фокусы. Изучение работы зрительного аппарата в необычных условиях позволяет глубже познать сложные процессы, происходящие в глазу и в нашем сознании при синтезе образов окружающей нас действительности.

Тем, кто захочет более подробно познакомиться с опытами по физиологической оптике, можно порекомендовать, например, такие книги: Дж. Грегг, «Опыты со зрением» (М.: Мир, 1970); М. Миннарт, «Свет и цвет в природе» (М.: Наука, 1969); С. Толанский, «Оптические иллюзии» (М.: Мир, 1967).

*Г. Косоуров*

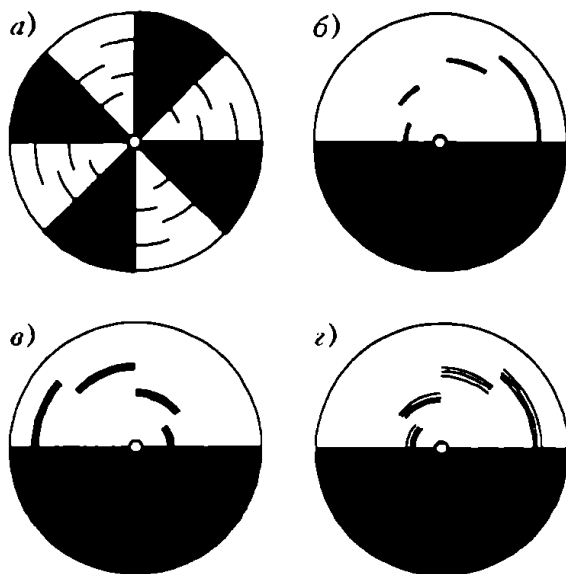
В этой статье предлагается несколько опытов по цветовому зрению. Все они связаны с различными цветовыми иллюзиями, вызванными необычными условиями работы глаза или его цветовым утомлением.

Механизм восприятия цветов глазом очень сложен и до конца еще не изучен. Известно, что сетчатка глаза содержит два рода светочувствительных клеток, которые носят название палочек и колбочек. В палочках содержится фотохимически чувствительный пигмент — зрительный пурпур, или родопсин. Под действием света родопсин обесцвечивается и действует на нервные волокна, передающие возбуждение в мозг. При ярком свете он обесцвечивается полностью, и палочки слепнут. В темноте идет обратный процесс — восстановление зрительного пурпура. Палочковое, сумеречное зрение обладает очень большой чувствительностью, но оно ахроматично — палочки не чувствуют цвета. При достаточно большой яркости вступает в силу колбочковый механизм зрения. Колбочковое зрение — светочувствительно. Есть много убедительных опытов, приводящих к выводу, что колбочки содержат фотохимически чувствительные пигменты трех сортов с максимумом чувствительности в красной, зеленой и синей областях спектра. Различная степень выцветания всех трех пигментов дает в нашем сознании ощущение цвета и позволяет видеть мир во всем разнообразии красок, оттенков, полутонов и переходов. На трехцветной природе цветового зрения основано воспроизведение цветов в кино, в телевидении, в цветной фотографии и в полиграфии. Методы количественного измерения цветов также основаны на трехцветном принципе.

Однако ощущение цвета можно вызвать не только красками но и, например, прерывистым освещением. Перечертите тушью на чертежную бумагу черно-белые диски, показанные на рисунке. Достаточно, чтобы диски имели диаметр 8 — 12 см. Вырежьте

---

Опубликовано в «Кванте» №11 за 1970 год.



диски и приведите их в не очень быстрое вращение, примерно с частотой 1 - 3 оборота в секунду. Для этого можно надеть их на ось наматывателя кинопроектора, проигрывателя, магнитофона или просто сделать из дисков волчки. Любопытно, что вместо черных дуг вы увидите цветные окружности. Окраска зависит от скорости вращения, освещенности и характера рисунка. Например, у диска на рисунке *а* дуги, следующие за черным сектором (по направлению вращения), при слабом освещении кажутся красными, а при ярком - желтыми. При некоторой скорости вращения и ярком освещении черные секторы кажутся синими. Полного объяснения этому явлению пока еще нет.

Краски различаются не только цветом, но и насыщенностью. Если постепенно добавлять к красной краске белила, цвет будет становиться все более розовым. На картинах и тем более на типографских копиях с картин трудно получить насыщенные тона и большие градации яркости. Отношение яркости самой белой краски к яркости самой черной едва достигает ста, а в природе мы имеем дело с различием в яркости во много тысяч раз. Поэтому копии с картин кажутся слишком бледными либо, наоборот, слишком темными. Это нарушает один из элементов восприятия объемности - воздушную перспективу. Изображение пейзажа или жанровой сцены выглядит плоским. Значительно шире диапазон передаваемых яркостей при проекции на экран диапозитивов. Именно поэтому так выразительны и объемны фотографии на цветной обратимой пленке - слайды.

Восприятие картины можно значительно улучшить, освещая ее специальным образом. Возьмите какую-нибудь цветную картинку, сфотографируйте ее и отпечатайте контактным способом с пленки на пленку контрастный черно-белый диапозитив. Вставьте диапозитив в проектор с большим световым потоком и спроектируйте диапозитив на оригинал так, чтобы контуры проекции и оригинала точно совпадали. Результат не заставит вас пожалеть о затраченном труде. Картина оживет, приобретет объемность и особую выразительность. Выключите проектор, и вы убедитесь, насколько тускла и невыразительна картина при равномерном освещении.

Следующие опыты относятся к так называемым последовательным цветовым образам. Это явление связано с тем, что полное восстановление цветочувствительного пигмента — процесс сравнительно медленный. Если продолжительное время смотреть на одноцветный рисунок, а потом перевести взгляд на белую бумагу, стену или потолок, то белый цвет будет восприниматься так, как будто в нем недостает цвета, утомившего глаз. На белой поверхности будет виден тот же рисунок, но окрашенный в цвет, который называют дополнительным.

Вырежьте из цветной бумаги красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий и фиолетовый квадратики размером  $2 \times 2$  см. Положите один из цветных квадратиков перед собой на лист белой бумаги и смотрите на него, не напрягая глаз, секунд тридцать. Смотреть надо, как говорят, в одну точку, чтобы изображение квадрата не перемещалось по сетчатке. Переведите взгляд на белое поле, и через секунду-две вы увидите на бумаге четкое изображение квадрата в дополнительном цвете. Так вы узнаете, что дополнительным к красному цвету является зеленый, к синему — оранжевый, а к желтому — фиолетовый. Каждая пара дополнительных цветов в смеси должна давать белый или серый ахроматический цвет.

Для смешения дополнительных цветов положите рядом два дополнительных квадратика и поставьте между ними стеклянную пластинку. Расположите глаз так, чтобы один квадратик видеть сквозь стекло, а другой — отраженным в стекле. Меняя наклон стекла и, тем самым, соотношение между световыми потоками, идущими от квадратиков, можно добиться того, что окраска в месте перекрытия изображений почти исчезнет. Для полной ахроматизации изображения нужен точный подбор цветов. Чаше всего получается бурая окраска. Но если взять два явно не дополнительных цвета, например зеленый и желтый или красный и фиолетовый, яркая окраска получится при любой их смеси. Еще

более яркие цветовые образы возникают, если квадратики класть не на белую бумагу, а на дополнительный фон.

После того как вы приобрели опыт наблюдения на простых фигурах, попробуйте сделать из цветной бумаги аппликацию какого-нибудь незатейливого пейзажа, заменив в пейзаже цвета на дополнительные. Рассматривая картинку так же, как рассматривали квадратики, вы очень скоро научитесь видеть на белом фоне пейзажи в натуральных цветах. Для успеха нужно только достаточно яркое освещение.

Самую поразительную и самую непонятную цветовую иллюзию дает наш последний опыт. Мы уже говорили, что в основе воспроизведения цветов лежит трехцветная система. Если три раза сфотографировать одну и ту же сцену через три светофильтра: красный, зеленый и синий и, отпечатав позитивные копии, спроектировать их тремя проекторами на одно и то же место экрана через те же светофильтры, то на экране появится цветное изображение с правильной передачей цветов. При этом светофильтры должны быть подобраны так, чтобы в сумме они давали белый цвет. Можно ограничиться двумя фотографиями через два дополнительных светофильтра, например красный и зеленый. При этом тоже получается хорошая цветопередача, хотя и не столь совершенная, как в трехцветном способе. Но, оказываясь, при проекции можно ограничиться и одним цветным светофильтром. Снимите одну и ту же цветную сцену, не перемещая аппарат, два раза на панхроматическую пленку через красный и зеленый светофильтры. В точном подборе светофильтров нет необходимости. Вполне подойдут светофильтры из школьного набора. Контактно отпечатайте на пленку позитивные копии. Полученные диапозитивы вставьте в два проектора и спроектируйте диапозитивы на экран так, чтобы контуры изображений точно совпали. Перед объективом проектора, в который вставлен диапозитив, снятый через красный фильтр, поставьте красный светофильтр, а второе изображение оставьте черно-белым. Вы увидите цветное изображение во всем богатстве красок, несмотря на то что проектируете вы только красное и черно-белое изображения с разным распределением света и тени. Любые объективные исследования света, отраженного разными местами экрана, дадут только красный цвет различной степени чистоты или насыщенности. Ощущение цветов в данном случае чисто субъективное. Как правило, ощущение наиболее правильной цветопередачи возникает при небольшой освещенности экрана.

Таким образом, и простое и очевидное полно тайн и загадок.

# ВОЛНЫ В МЕЛКОЙ ТАРЕЛКЕ

*А. Косоуров*

Нет в природе явления более универсального, чем распространение волн. Волны на поверхности воды, звук, свет, радио, передача деформации от одних частей твердого тела к другим — все это волновые процессы. Квантовая механика показывает, что и движением микрочастиц управляют волновые законы. Волны могут иметь разную физическую природу, разные скорости распространения, разные частоты и длины волн. Но независимо от этого в движении любых волн много общего. Изучив законы распространения волн одной природы, большинство из них можно практически без изменения перенести на волны другого типа. Изучать же волны удобнее всего на поверхности воды.

Что такое волна? Бросьте в пруд камень. На спокойной горизонтальной поверхности пруда возникнут разбегающиеся круги. Точки поверхности воды, до которых дошла волна, начинают колебаться относительно своего равновесного положения. Это положение соответствует горизонтальной поверхности. Чем дальше находится точка от места падения камня, тем с большим запозданием «узнает» она о падении камня. Возмущение распространяется с определенной скоростью. Точки, до которых возмущение дошло одновременно, находятся в одинаковой стадии колебательного движения, т.е. в одинаковой фазе. Скорость перемещения этой фазы и есть скорость волны. Она измеряется в направлении нормали к фронту волны.

Для волн любой природы всегда можно указать физические объекты, которые под действием волны испытывают возмущение, т.е. отклоняются от своих равновесных значений. Для звука — это периодические повышения и понижения давления, для радиоволн и света — быстрые изменения напряженности электрического и индукции магнитного поля. Свойства всех без исключения сред таковы, что возмущение, возникшее в некото-

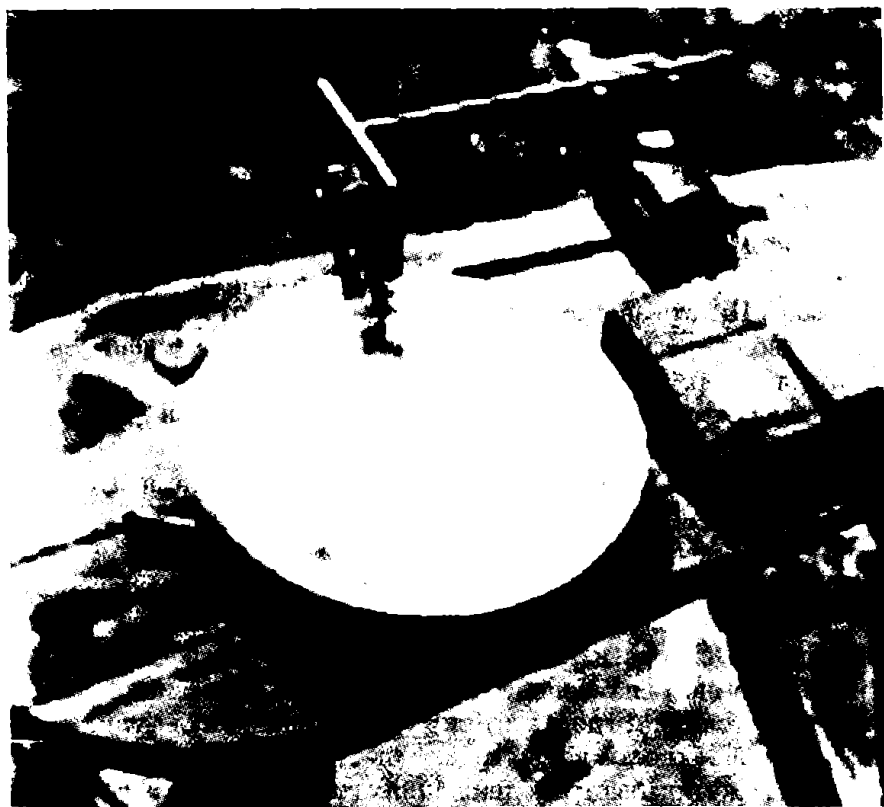
---

Опубликовано в «Кванте» №1 за 1971 год.

рой области, распространяется от точки к точке с конечной скоростью, которая зависит от природы возмущения и свойств среды.

Для возникновения волны необходим источник возмущения, т.е. внешняя причина, вызывающая в некоторой области среды нарушение равновесия. Источник малого размера, как например камень, брошенный в воду, излучает в однородной среде (т.е. в такой среде, в которой скорость волны не зависит от направления ее распространения) сферические волны (на поверхности воды – круговые), распространяющиеся по радиусам. Такие источники волн называют точечными,

Один из основных принципов элементарной волновой теории – принцип независимости волн, или принцип суперпозиции. Он утверждает, что возмущение, которое вызывает волна в точке наблюдения, не зависит от того, что через эту точку одновременно проходят другие волны. Принцип суперпозиции дает простое правило для нахождения суммарного действия волн от нескольких источников: результирующее колебание просто равно сумме колебаний, вызываемых каждым источником в отдельности.



Характерная особенность волновых процессов — интерференция волн. Интерференцией называют совокупность явлений, возникающих в среде при распространении волн от двух или нескольких источников, колеблющихся согласованно (синхронно). При этом оказывается, что в некоторых точках среды колебания, вызванные одновременным действием двух источников, будут сильнее или слабее, чем колебания, вызванные каждым источником в отдельности. Может случиться, что согласованные волны вообще погасят одна другую. На первый взгляд явление интерференции противоречит принципу суперпозиции. Прежде чем обсуждать это, постараемся посмотреть на интерференцию собственными глазами. Искушенный глаз без труда увидит интерференцию при пересечении волн от двух брошенных в пруд камней. Однако для изучения интерференции этот способ не годится. Предлагаем получить устойчивую интерференционную картину водяных волн на лабораторном столе.

Прежде всего необходим сосуд с водой. Чтобы волны, отраженные от его стенок, не маскировали волн, идущих от источников, нужен сосуд с пологими стенками. В этом отношении хороша обыкновенная мелкая тарелка, в которую вода наливается почти до самого верха. Набегая на стенки, волны быстро затухают и почти не отражаются. Генератором волн может служить электрический звонок с отвинченным колпачком. К молоточку звонка прикрепите кусок проволоки, на ее конец наденьте пробковый шарик, который и будет точечным источником волн. Проводя опыты, следите за тем, чтобы провода были хорошо изолированы.

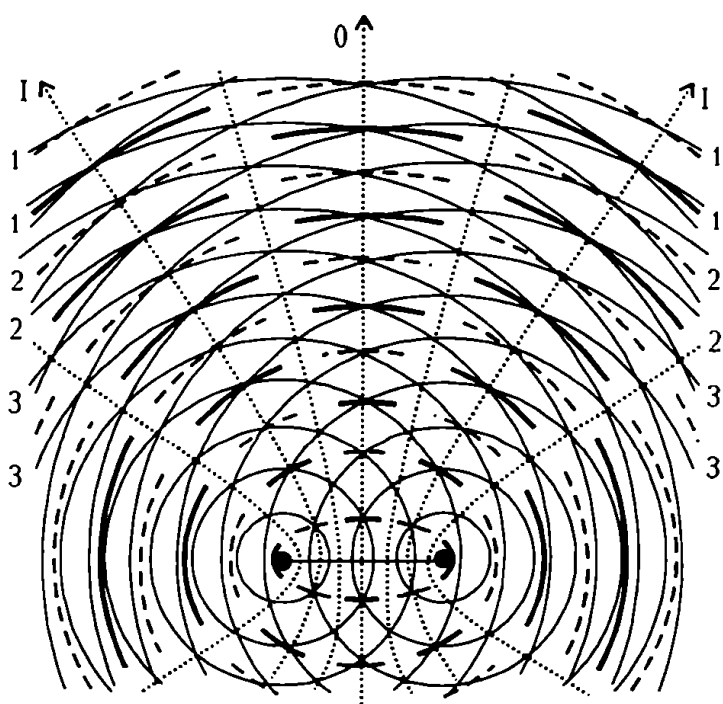
Звонок нужно укрепить над тарелкой так, чтобы поворотом звонка можно было погружать пробковый шарик в воду у края тарелки. Питая звонок лучше всего через автотрансформатор — это позволит регулировать амплитуду колебаний. Очень удобен автотрансформатор от детской железной дороги, подойдет и трансформатор от прибора для выжигания. Включив устройство, мы увидим на поверхности воды круговые волны с расстоянием между соседними горами — длиной волны — около 1 см.

Наблюдать волны лучше всего по тени на дне тарелки при прямом солнечном свете или свете яркой лампы. Каждая волна, действуя как цилиндрическая линза, дает на дне тарелки светлую полосу, повторяющую форму фронта волны. Однако волны, бегущие со скоростью около 10 см/с, сливаются для взгляда, фиксированного на неподвижной тарелке. Они видны только вблизи источника, где их амплитуда велика. Чтобы увидеть их на всей поверхности воды, нужно быстро поворачивать голову. Точно так же при быстрых движениях головы можно рассмотреть

спицы катящегося колеса. Очень эффектно наблюдать волны на матовом стекле фотоаппарата, особенно крупноформатного. Держа камеру в руках и плавно покачивая ее, легко добиться, чтобы волны были видны на всей поверхности. При этом кажется, что они бегут очень медленно. Можно смотреть на отражение поверхности воды и в зеркале. Легкие движения зеркала также делают волны видимыми по всей поверхности. Но удобнее всего наблюдать волны при стробоскопическом освещении. Если освещать установку короткими вспышками света с частотой, равной частоте источника волн, то от одной вспышки до другой волны переместятся на одну длину волны, и волновая картина волн будет казаться неподвижной. Такое освещение чрезвычайно легко осуществить. Достаточно параллельно обмоткам магнита звонка включить небольшую лампочку. С расстояния 0,5 – 1 м она равномерно осветит установку, и неподвижная теневая картина волн будет хорошо видна. Для фотографирования лучше воспользоваться прямым солнечным светом.

Укрепите теперь на молоточке звонка согнутую из проволоки вилку с кусочками пробки на концах. Расстояние между концами вилки 2 – 3 см. Если концы будут опускаться в воду одновременно, получатся два источника волн, колеблющихся не только синхронно, т.е. в такт, но и синфазно, т.е. волны от обоих источников будут возникать в один и тот же момент времени. Картина будет примерно такой: от источников волн веером расходятся области больших амплитуд, разделенные областями «молчания»; центральная область больших амплитуд расположена перпендикулярно линии, соединяющей источники; как области молчания, так и области больших амплитуд проходят между источниками.

Исследование интерференционной картины с линейкой покажет, что расстояние между двумя максимумами на линии, соединяющей источники, равно половине расстояния между двумя горбами, т.е. половине длины волны. Если изменить расстояние между источниками, то изменится и число полос большой амплитуды. Чем больше расстояние между источниками, тем больше «перьев» в нашем веере. Но расстояние между максимумами на линии, соединяющей источники, всегда равно половине длины волны. Поэтому общее число полос с максимальной амплитудой будет вдвое больше, чем число длин волн, укладывающееся на расстоянии между источниками. Отсюда следует, что если расстояние между источниками меньше половины длины волны, то интерференции вообще не будет. Такие источники действуют как один, давая одну систему круговых волн. Это можно увидеть, постепенно уменьшая расстояние



между источниками. Обратите внимание еще и на то, что, продолжая в какой-нибудь области больших амплитуд фронт волны, проходящий через горб, мы в соседней области встретим впадину. Другими словами: при переходе через нулевую область фаза волны меняется на половину полного колебания.

Теперь представьте себе, что у нас не два молоточка, а два источника света, излучающих световые волны, и перпендикулярно поверхности воды мы помещаем экран. Мы увидим освещенные места, соответствующие пересечению экрана и областей с большой амплитудой, и темные, не освещенные места. Мы увидим темные и светлые интерференционные полосы. О том, как осуществить интерференционный опыт в оптике, поговорим как-нибудь в другой раз, а сейчас попробуем объяснить то, что увидели.

Нарисуем на листе бумаги обе системы волн так, словно они замерли в какой-то момент (см. рисунок). Горбы волн отметим сплошными жирными линиями, а впадины — пунктирными. Перенумеруем волны, отметив одинаковыми числами те, которые вышли из источников одновременно. Из чертежа видно, что на линию, равноудаленную от источников, одновременно приходят волны, имеющие одинаковые номера. Это и понятно, так как до точек этой прямой волны прошли одинаковые пути. По принципу

суперпозиции мы можем заключить, что на этой линии удвоятся как высоты горбов, так и глубины впадин. Правее и левее этой линии лежат точки, в которых горбы одной системы волн совпадут со впадинами другой. В то время как волны от одного источника вызовут в этих точках отклонение вверх, волны от другого в тот же момент вызовут в этих точках отклонение вниз. Суммарное отклонение в этих точках будет близко к нулю. Соединим все такие точки непрерывной линией. Если проследить за нумерацией горбов и впадин, легко заключить, что до всех точек правой линии левые волны проходят путь на половину длины волны больший, чем правые. Для левой линии на половину длины волны отстают правые волны. Справа и слева от нулевых линий лежат точки пересечения первого горба со вторым, второго с третьим и т.д. Легко понять, что это тоже области максимумов. Соединив эти точки, мы получим линию, до точек которой одна система волны отстает от другой на одну длину волны. Продолжая анализ чертежа, можно найти все нулевые линии и все линии максимумов. Линии, которые мы получили, это гиперболы.

Теперь совершенно ясно, почему расстояние между максимумами на линии, соединяющей источники, равно половине длины волны. Действительно, в среднюю точку этой линии волны приходят в одинаковой фазе и усиливают друг друга. Если сместиться из этой точки на полдлины волны, то путь одной волны увеличится на половину длины волны, а другой — уменьшится на такую же величину. Разность хода между волнами в этой точке (разность путей, пройденных волнами от источников до точки) будет равна одной длине волны, волны снова будут взаимно усиливаться, и т.д. через каждую половину длины волны.

Максимум, соответствующий нулевой разности хода, называют нулевым максимумом, или нулевым порядком интерференции. Максимумы с разностью хода в одну длину волны — максимумами первого порядка интерференции и т.д. Максимальный порядок интерференции определяется целым числом, ближайшим к  $2d/\lambda$ , где  $d$  — расстояние между источниками, а  $\lambda$  — длина волны. Теперь попробуйте проанализировать сами с помощью чертежа, а может быть, и проверить экспериментально, как изменится картина, если один из источников будет излучать волны с запозданием на половину периода или на какую-нибудь другую его часть. А если сдвиг между колебаниями будет меняться случайным образом? Заметим, что для экспериментального осуществления волн со сдвигом фаз достаточно сделать концы вилки разной длины.

# СТРАННЫЙ МАЯТНИК

*Н. Минц*

Обычный, хорошо знакомый вам математический маятник не меняет плоскости своих колебаний. На этом свойстве маятника основана известная демонстрация вращения Земли — опыт Фуко. Маятник на длинном подвесе совершает колебания. Под ним размечен круг, напоминающий циферблат. Благодаря тому что плоскость колебаний маятника относительно неподвижных звезд не меняется, а Земля вращается вокруг своей оси, с течением времени маятник проходит последовательно над всеми отметками круга. На полюсе за сутки круг под маятником совершит полный оборот. Впервые такой опыт был проведен с маятником длиной 67 м французским физиком Л. Фуко в 1851 году под куполом Пантеона в Париже.

Но всякий ли маятник обязательно сохраняет плоскость колебаний? Ведь нить подвеса позволяет ему колебаться в любой вертикальной плоскости.

Попробуйте сделать такой маятник, как показано на рисунке 1. Для этого возьмите нитку, сложите ее пополам, а к середине

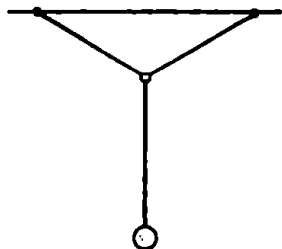


Рис. 1

привяжите еще одну нитку. К другому концу этой второй нитки прикрепите ложку, ножницы или какой-нибудь другой грузик — и маятник готов. (Вертикальная нить подвеса должна быть достаточно длинной. По крайней мере не меньше, чем нить наклонного подвеса.) Подвесьте маятник за оба конца сложенной пополам нитки на кнопках или гвоздиках (например, в дверной проем). Если теперь отклонить маятник от положения равновесия и затем отпустить, то вы увидите любопытную картину. Грузик будет двигаться по эллипсу, причем этот эллипс будет постоянно меняться, вытягиваясь то в одну, то в другую сторону. Почему это происходит?

---

Опубликовано в «Кванте» №6 за 1971 год.

У маятника с одной точкой подвеса (рис. 2) плоскость колебаний ничем не выделена. Каким бы ни было первоначальное отклонение маятника, все силы, действующие на него, лежат в одной плоскости. Нужно только, отпуская маятник, не толкнуть его вбок. Действительно, проведем плоскость через первоначальное и отклоненное положения маятника. Очевидно, в этой плоскости будут лежать как сила тяжести  $m\vec{g}$ , так и сила

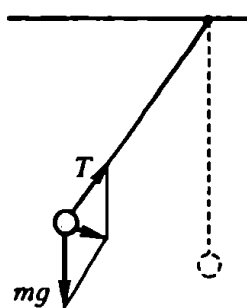


Рис. 2

натяжения нити  $\vec{T}$ . Следовательно, равнодействующая этих сил, которая, собственно, и заставляет маятник колебаться, при любом отклоненном положении маятника также лежит в той же плоскости. Это означает, что нет сил, которые могли бы вывести маятник из этой плоскости. Потому-то маятник и сохраняет плоскость своих колебаний.

Другое дело наш маятник. Здесь точками закрепления и линией отвеса строго фиксирована первоначальная плоскость. Поэтому с самого начала маятник отклонен так, что он не лежит в этой плоскости. (Конечно, если отклонить маятник строго перпендикулярно плоскости подвеса, он будет совершать колебания в одной плоскости, перпендикулярной плоскости подвеса. Но практически всегда существуют отклонение от перпендикуляра и скорость, не лежащая в плоскости первоначального отклонения.) Сила натяжения  $\vec{T}_1$  (рис. 3) имеет составляющую, перпендикулярную первоначальной плоскости. Благодаря этой составляющей движение маятника выходит из первоначальной плоскости. При этом, поскольку сила натяжения не постоянна, меняется и ее перпендикулярная составляющая. Далее, отклоняясь в противоположную сторону, маятник натягивает другую из закрепленных нитей. Это приводит к появлению силы, действующей в другом направлении. При этом, как показывает опыт, и возникает движение по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

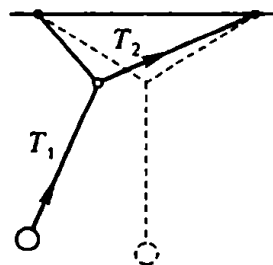


Рис. 3

Кривые, которые описывает наш маятник, называются фигурами Лиссажу. Фигуры Лиссажу получаются при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний. Они могут быть довольно сложными, особенно при близких частотах продольных и поперечных колебаний. Если частоты одинаковы, траек-

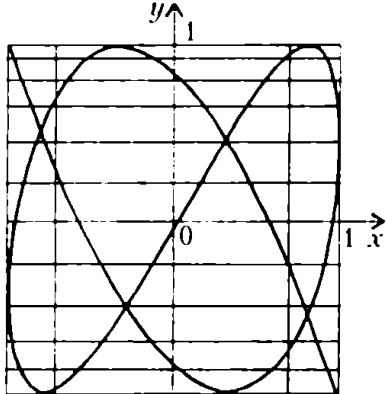


Рис. 4

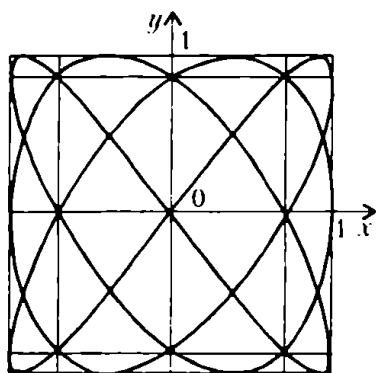


Рис. 5

торией движения будет эллипс. Фигура, показанная на рисунке 4, описывается маятником, уравнения движения которого выглядят следующим образом:  $x = \sin 3t$ ,  $y = \sin 5t$ . Рисунок 5 соответствует таким уравнениям колебаний:  $x = \sin 3t$  и  $y = \sin 4t$ .

Соотношение частот можно варьировать, меняя отношение длин вертикальной и наклонной нитей подвеса. При этом вычислить частоты колебаний маятника довольно сложно, а вот увидеть фигуры, вычерчиваемые им, значительно проще.

Чтобы увидеть фигуры Лиссажу, можно, например, к подвесу нашего маятника прикрепить ведро с дырявым дном, наполненное песком, а на пол положить кусок картона, окрашенный в темный цвет. Тогда маятник «нарисует» отчетливую траекторию своего движения. Можно получить и фотографии траекторий движения маятника. Для этого возьмите грузило или тяжелый

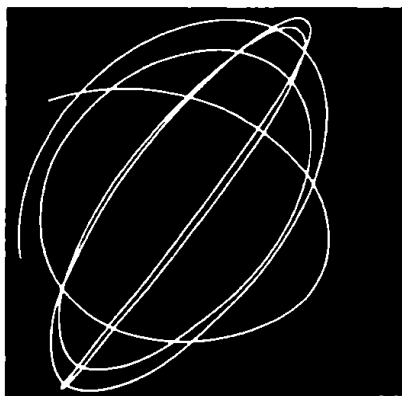


Рис. 6

маленький шарик и покрасьте его белой краской. Сделайте из темных ниток такой же подвес, как у маятника, изображенного на рисунке 1. Под маятник подложите лист черной матовой бумаги (гладкая бумага может отсвечивать, а это будет мешать наблюдениям). Фотографировать надо сверху. Установите фотоаппарат так, чтобы плоскость объектива была горизонтальна. При достаточно большой выдержке на фотоснимках можно увидеть четкие траектории.

На рисунках 6 и 7 приведены фотографии траекторий, полученные таким способом. Видно, что маятник изменял направление колебаний. В случае, изображенном на рисунке 6, это изменение произошло более резко. Время экспозиции этих двух фотографий различно. Это видно хотя бы из того, что длина траекторий неодинакова. Получившиеся кривые как бы вписаны в параллелограмм. На самом деле они должны быть вписаны в прямоугольник.

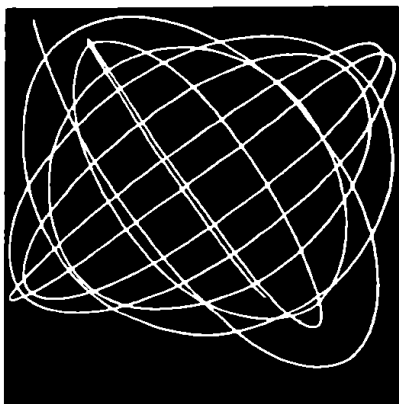


Рис. 7

То, что у нас не получился прямоугольник, объясняется просто: плоскость объектива была не строго горизонтальна.

В опытах с маятником следует учитывать, что более или менее правильная траектория получается только в том случае, когда нет сильных затуханий. Колебания маятника с малой массой груза и достаточно большим объемом будут быстро затухать. Такой маятник качнется несколько раз, быстро уменьшая амплитуду. Естественно, при движении с сильным затуханием увидеть и сфотографировать изменение направления колебаний маятника не удастся.

На практике с фигурами Лиссажу приходится встречаться довольно часто в тех случаях, когда два колебания оказываются взаимно перпендикулярными. Так, эти фигуры неизбежно появляются при настройке осциллографа.

*Дж. Грегг*

**Опыт 1. Адаптация к темноте.** В яркий солнечный день, когда вы с улицы входите в неосвещенную комнату, вам кажется, что в доме царит глубокая ночь. Но вскоре вы уже прекрасно ориентируетесь, несмотря на относительно малую освещенность: ваши глаза приспособились — произошла адаптация к темноте. В результате адаптации чувствительность глаза к свету возрастает в миллион раз. При идеальных условиях глаз, полностью адаптированный к темноте, может заметить свет от обыкновенной свечки, удаленной на 20 км.

Наблюдать процесс адаптации очень просто: вечером перейдите из хорошо освещенной комнаты в темную. Заметьте, сколько времени понадобится вам для того, чтобы различить цифры на часах со светящимся циферблатом или прочесть заголовок газеты, если из окна или из приоткрытой двери идет слабый свет.

Очень слабый свет лучше виден, если смотреть чуть мимо него. Так, неяркая звезда в небе покажется ярче, если посмотреть немного в сторону от нее. Проверьте это, когда представится удобный случай.

Приведем простой опыт, иллюстрирующий адаптацию глаза к темноте. Возьмите кусок черного картона размером 20 × 25 см. По обе стороны от центра на расстоянии 5 см приклейте к картону белые кружок и квадрат. Держите картон, как книгу во время чтения. Пусть ваш партнер внезапно погасит свет. Ваши глаза постепенно приспособятся к темноте, и вы увидите белые пятна (на невидимом картоне). Подсчитайте, сколько времени пройдет с момента, когда выключат свет, до момента, когда вы сможете различить кружок и квадрат. Возьмите в руки картон (до того, как погасят свет), но обратите его фигурами от себя и еще поворачивайте, чтобы не знать, где расположены белый круг и квадрат; когда свет погасят, поверните картон к себе той стороной, где должны быть фигуры. Обратите внимание — кружок

---

Опубликовано в «Кванте» №8 за 1971 год.

виден лучше, если смотреть не на него, а на квадратик. Можете ли вы объяснить, почему? (Если вы внимательно прочли начало описания этого опыта, то сможете правильно объяснить его результаты.)

**Опыт 2. Послеобразы.** Число послеобразов, которые вы можете наблюдать, бесконечно. Термин «послеобраз» означает, что образ остается после того, как вызвавший его раздражитель перестает действовать. Послеобраз называется положительным, когда он содержит такое же распределение ярких и темных участков, как и сам раздражитель, и отрицательным, когда распределение ярких и темных участков противоположное.

Наиболее интересны наведенные послеобразы. Эффект наведения вызывается чем-то дополнительным к основному раздражителю, например фоном, на котором рассматривается послеобраз; этот фон может представлять собой либо узор, либо серое поле, либо цветное поле. Сначала всегда показывают основной раздражитель — рисунок, цвет. Затем наблюдатель смотрит на какой-либо фон. Легче всего обнаружить наведенный послеобраз на нейтральном сером фоне.

На рисунке 1 показаны фигурки, с помощью которых можно получить хорошие послеобразы. Такие фигурки надо наклеить на серый картон. Оставьте в поле зрения только одну фигурку и смотрите на нее 30 — 60 секунд. Затем переведите взгляд на серый фон. Света в комнате должно быть не слишком много (сумрачное освещение). Вы можете увидеть птицу, летящую по потолку, по стене, по вашей ладони, ибо ваш глаз проектирует послеобраз на любую поверхность, которую вы рассматриваете.



Рис. 1

Вырежьте любые изображения из цветной бумаги и поэкспериментируйте с фигурами разного цвета. Посмотрев на такую фигуру, переведите взгляд на серый фон — и вы увидите послеобраз дополнительного к первоначальному цвета. Таким образом вы познакомитесь с одним из основных принципов формирования наведенных послеобразов. Возьмите фон такого же цвета, какой свойствен первому раздражителю. Например, смотрите на ярко-красный квадрат в течение минуты, а затем переведите взгляд на лист красной бумаги. Как выглядит послеобраз? Оставьте тот же основной раздражитель, но фон возьмите

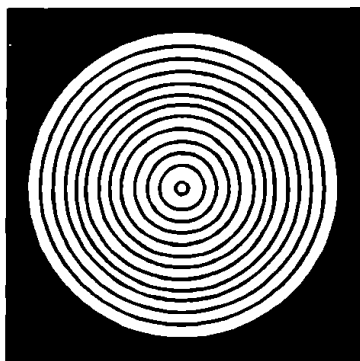


Рис. 2

зелено-голубого цвета, т.е. цвета, дополнительного к красному. Как отличается нынешний послеобраз от предыдущего и от того, который получился на сером фоне? Попробуйте различные цвета и различные сочетания для основного раздражителя и для фона.

Узор, состоящий из концентрических окружностей (рис. 2), — очень сильный раздражитель, легко вызывающий послеобраз. При рассматривании его возникают эффекты

движения или качения. Такие же эффекты наблюдаются в его последовательном образе. Сделайте такой рисунок диаметром 30–50 см. Установите в стороне большой серый экран для рассматривания послеобраза. Если ваш рисунок цветной, эффект получится особенно впечатляющим.

**Опыт 3. Инерция зрения.** Бегущая на киноэкране лошадь, конечно, никуда не бежит. Не бежит она и на телевизионном экране. И вообще «движущиеся» в кадре объекты неподвижны — перемещаются сами кадры, но с такой скоростью, что че-

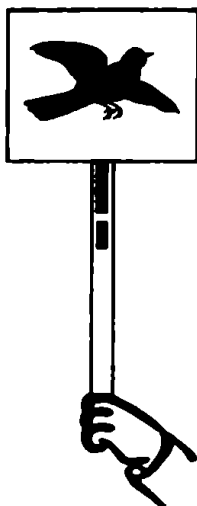


Рис. 3

ловеческий глаз не замечает их смены. Видеть на экране движение можно потому, что зрение человека обладает определенной инерцией. Иначе говоря, любое зрительное ощущение сохраняется еще некоторое время после того, как исчезает вызвавший его образ. Поэтому, если образы сменяются достаточно часто, видимое изображение предыдущего образа плавно переходит в последующий образ, а при определенных условиях их можно увидеть и одновременно.

На рисунке 3 показан приборчик (его называют «таумотроп»), вращая который можно продемонстрировать инерцию зрения. Если вращать его достаточно быстро, рисунок с одной стороны совмещается с рисунком, находящимся на противоположной стороне. Такой прибор легко сделать самим. На одной стороне картонного квадрата наклейте рисунок птицы, а на другой — рисунок клетки (рис. 4). Воткните иглу одним концом в край картонного квадрата, другим в карандаш. Вращайте карандаш — и птица будет в клетке.

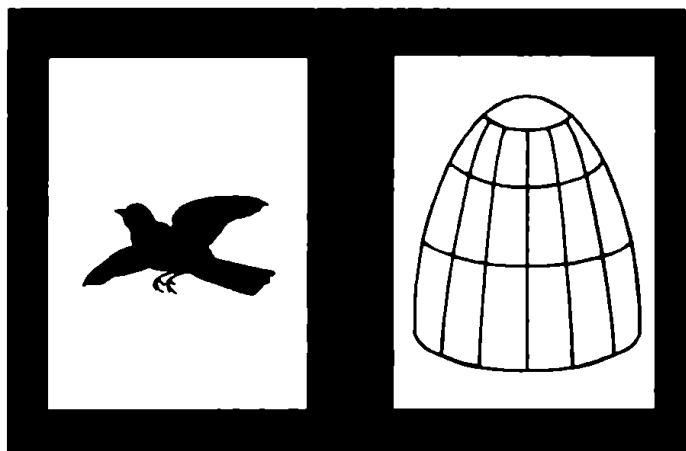


Рис. 4

Если у вас есть проекционный фонарь (или фильмоскоп), вы можете довольно эффектно показать феномен инерции зрения. Небольшой лист бумаги поместите примерно в 1 – 1,5 м перед проектором. Большой экран не годится – нужна поверхность, на которой можно получить только часть изображения. Вставьте диапозитив в проектор и фиксируйте изображение так, чтобы оно занимало весь лист. Один конец метровой линейки закройте белой бумагой на 25–30 см. За другой конец держите линейку горизонтально. «Выбеленный» конец линейки поместите в то же положение, куда вы ставили лист бумаги. Чуть перемещая линейку, найдите такое ее удаление от проектора, при котором любая часть изображения оказывается четко сфокусированной на белом конце линейки. Теперь приступайте: быстро перемещайте линейку вверх-вниз, вверх-вниз. Наблюдатели, стоящие за проектором, видят полное изображение цветного рисунка в воздухе в том месте, где вы двигаете линейку. Это происходит потому, что отдельные куски изображения, непосредственно видимые только в те моменты, когда они проектируются на линейку, сохраняются зрением в течение некоторого времени, достаточного для того, чтобы вы успели, передвинув линейку, показать следующие куски кадра.

Таким же способом получается и телевизионная картинка. Только там не линейка, а электронный луч показывает одну за другой горизонтальные строчки изображения. А целая картинка получается благодаря инерции зрения.

**Опыт 4. Куб-перевертыш.** Из 12 проволочек или круглых палочек сделайте каркас куба. Эффект будет лучше, если весь материал покрасить в матово-черный цвет. Сделайте сначала две

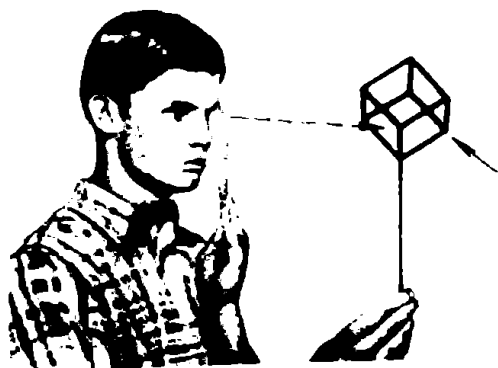


Рис. 5

четырёхугольные стороны каркаса, а затем скрепите их четырьмя палочками. К одному из углов прикрепите палочку подлиннее — держалку. Все можно сделать на клею и затем укрепить черной ниткой.

Держите куб перед собой так, чтобы дальний его угол был виден примерно посередине одной

из сторон куба, а другой глаз закройте (рис.5). Смотрите, не отрываясь, на дальний угол куба. Внезапно вы увидите, как куб «выворачивается наизнанку» так, что дальний угол кажется торчащим впереди, самым близким. При медленном вращении палочки куб «переворачивается» в направлении, противоположном направлению вращения. Подвигайте палочку назад-вперед, и вы увидите, как странно ведет себя куб-перевертыш.

Предварительно потренируйтесь, чтобы научиться видеть все как следует. Лучше проводить опыт на фоне гладкой стены. Если опыт не получается, попробуйте сменить фон, чуть поверните куб, наклоните или слегка деформируйте его. Немного повозившись, вы будете наблюдать эффект совершенно отчетливо. Но помните, что он получается, только когда вы смотрите одним глазом. Когда работают оба глаза вместе, они видят глубину так хорошо, что этим кубом их не обманешь, а вот один глаз обязательно ошибется, определяя, которая часть куба ближе. Впрочем, у некоторых людей эффект получается и при наблюдении обоими глазами. Главное, неподвижно фиксировать взгляд обоих глаз на одном (дальнем) угле куба.

*Р. Вуд*

Как известно, для образования резко очерченных миражей необходимо наличие горизонтальной плоскости с максимальным коэффициентом преломления. При движении вверх и вниз от этой плоскости оптическая плотность уменьшается пропорционально расстоянию от нее. Горизонтальный или почти горизонтальный луч отклоняется к плоскости с максимальной плотностью и пересекает ее. Затем он меняет свою кривизну и опять отклоняется к плоскости, которую пересекает снова и снова, проходя по траектории, близкой к синусоиде.

Наблюдая траекторию луча света в сосуде, наполненном раствором соли (оптическая плотность раствора увеличивалась с глубиной), я подумал, что, изменяя коэффициент преломления жидкости, можно было бы заставить луч перемещаться по синусоиде. В результате получились довольно красивые опыты, которые можно показывать в аудитории.

Я сделал сосуд из толстого листового стекла длиной приблизительно 50 см, высотой 10 см и шириной 2 см, на 3 см наполнил его концентрированным раствором квасцов, а сверху налил слой водного раствора спирта (~ 10%) толщиной 3 см. (Добавка спирта повышает коэффициент преломления воды.) Доливать воду в сосуд нужно осторожно при помощи пипетки. В качестве жидкости с высоким коэффициентом преломления, плотность которой больше плотности воды, но меньше плотности раствора квасцов, я использовал смесь глицерина с 85%-ым спиртом. Правильная пропорция смеси легко находится экспериментально. Смесь должна плавать на растворе квасцов и тонуть в воде. Вводится она между двумя слоями жидкостей при помощи пипетки. Толщина слоя около 3 см.

Все три раствора нужно подкислить несколькими каплями серной кислоты и добавлением хинина сделать флюоресцирующими. Разница в поверхностном натяжении между

слоями может причинить неприятности: когда пипетка вынимается, она может потянуть за собой смесь глицерина и спирта вверх через воду. При этом произойдет полное разрушение слоев. Чтобы этого не происходило, к воде добавляют спирт; можно добавлять воду к глицериновой смеси. Пипетку нужно выводить медленно и очень наклонно, так, чтобы тяжелая жидкость могла быть смыта до того, как трубка достигнет поверхности. Теперь можно осторожно встряхнуть сосуд, чтобы ускорить диффузию, после чего нужно оставить его в покое на несколько минут, пока не исчезнут четкие границы между слоями.

Если теперь параллельный пучок света пустить наклонно в один конец сосуда, то будет видно, как он перемещается по жидкости очень красивой голубой волной, кривизна которой меняется в зависимости от угла падения луча. Лучи света, движущиеся по синусоиде, показаны на рисунках 1 и 2. В одной из статей я прочитал, что параллельный или слегка расходящий-



*Рис. 1*



*Рис. 2*



*Рис. 3*

ся луч, входящий в среду, описанную выше, будет сжиматься в линию, а затем последовательно расходиться и сходиться (рис.3). Я никогда не видел описания этого эксперимента, хотя в статье утверждалось, что глаза некоторых насекомых работают аналогичным способом: зрительный орган состоит из прозрачного цилиндрического тела, ось которого имеет высокий коэффициент преломления; по мере отклонения от оси оптическая плотность непрерывно уменьшается.

Красивые миниатюрные пустынные миражи, которые я видел на городских тротуарах Сан-Франциско, навели меня на мысль воспроизвести это явление в миниатюре в аудитории. Хотя я уже

кратко описал опыты такого типа, сейчас повторю описание более подробно. Три или четыре совершенно плоские металлические пластины (каждая длиной приблизительно 1 м и шириной 30 см) монтируются конец к концу на железных треножниках и аккуратно выравниваются. Пластины должны быть достаточно толстыми (скажем, 0,5 см), чтобы не коробиться от нагревания. Я весьма успешно использовал гипсовые пластинки, отлитые из алебаstra (обожженного гипса) на толстом листовом стекле, хотя эти пластинки хрупкие и недолговечные. Возможно, очень хороши были бы пластинки из шифера (кровельного сланца), так как они выдерживают довольно сильный нагрев и их можно сделать плоскими и гладкими. Пластинки нужно посыпать толстым слоем песка, чтобы устранить отражение от поверхности. Поверхность песка должна казаться совершенно ровной. Для успешного проведения эксперимента нужна абсолютно ровная пустыня; поэтому не считайте, что вы уделили слишком много внимания регулированию пластинок. На одном конце пустыни нужно создать искусственное небо. Лучше всего использовать большое зеркало, установленное на окне и отражающее небо. Между небом и пустыней нужно установить небольшую цепь гор, вырезанных из картона. Отдельные вершины должны иметь высоту от 1 до 2 см, а долины между ними — лишь немного возвышаться над уровнем пустыни. Общее расположение показано на рисунке 4. Затем пластинки нагреваются с помощью

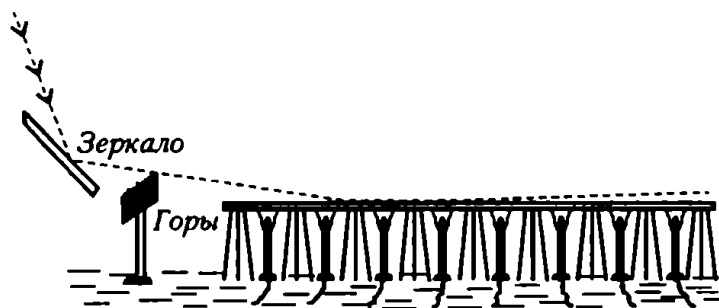


Рис. 4

газовых горелок, которые нужно время от времени передвигать, чтобы нагревание было равномерным.

Если мы теперь посмотрим вдоль пустыни немного выше уровня песка, мы увидим горы, четко выделяющиеся на фоне неба: по мере повышения температуры перед горной цепью начинает образовываться озеро, и через несколько мгновений появляется перевернутое изображение вершин, как будто бы

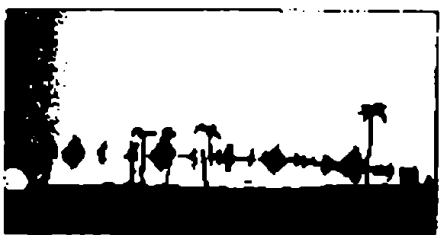
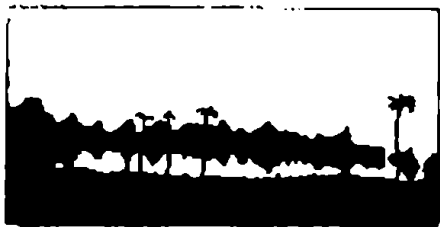


Рис. 5

отраженное в воде. Если смотреть немного ниже, подножья гор полностью исчезают в призрачном озере, которое теперь кажется вышедшим из берегов. Эти картины показаны на рисунке 5, причем фотографировался действительный мираж в искусственной пустыне. На первой фотографии показан вид над холодными пластинками, на второй – кажущееся озеро с отраженными в воде вершинами и на третьей – исчезновение подножий горных цепей. Для того чтобы усилить эффект, в песок были посажены две или три пальмы, вырезанные из бумаги.

В жаркой пустыне вертикальные размеры предметов могут увеличиваться. Если

убрать горы и на песок в дальнем конце пустыни положить небольшой мраморный шарик, то при определенном положении глаза круговой контур превратится в эллипс, а если глаз опускать, изображение сожмется в отрезок и в конце концов исчезнет. Увеличение размеров в этом случае вызвано тем, что прямое и отраженное изображения наблюдаются одновременно и при этом смещены друг относительно друга. Я наблюдал подобный случай на озере: когда вода теплая, а воздух холодный, пятна снега на противоположном берегу (слишком маленькие для того, чтобы различать их глазом с высоты нескольких метров над уровнем озера) становятся четко видимыми, если спуститься вниз к кромке воды.

Атмосферные условия, необходимые для возникновения миражей, могут также вызвать пылевые вихри, часто наблюдаемые в пустыне, а в большом масштабе и смерчи. Эти смерчи, так же, как и миражи, можно воспроизвести в маленьком масштабе. Одну из металлических пластин я посыпал кварцевым песком и нагревал несколькими горелками. Через несколько минут по поверхности начинали двигаться очень красивые маленькие смерчи, скручивая тонкий песок в воронкообразные вихри;

иногда это длилось 10--15 секунд. Однако вихри, созданные таким способом, нельзя наблюдать в большой аудитории. Поэтому я искал способы создать их в большем масштабе. Для этого после удаления песка хорошо нагревал пластинку и посыпал ее нашатырем: от горячей поверхности сразу же поднималось плотное облако белого пара и вскоре в центре появился самый настоящий миниатюрный смерч высотой около 2 см. Помещая пластинку в луч фонаря в темной комнате, можно демонстрировать вихри в большой аудитории. Я считаю, что лучше сначала насыпать на пластинку нашатырь, а затем нагревать ее: тогда вихри возникают почти непрерывно и часто сохраняются довольно долго.

На рисунке 6 показана мгновенная фотография одного из этих смерчей, сделанная при ярком солнечном свете.



Рис. 6

# СНЕЖНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

*А. Варнаховский, А. Виленкин*

Фотографии и рисунки снежинок можно найти во многих учебниках физики в главах, в которых рассказывается о симметрии. Но этим и ограничивался до недавнего времени интерес ученых к снежным кристаллам. Серьезное изучение зарождения, роста и структуры снежных кристаллов началось не так давно.

Интерес к снежным кристаллам был связан в основном с изучением образования дождя и явлений, происходящих в облаках. Оказалось, что большая часть дождевых капель начинает свою жизнь как снежные кристаллы, тающие прежде, чем они упадут на землю. Однако только холодные, находящиеся на большой высоте перистые облака состоят из кристалликов льда.



В основном же облака представляют собой скопления маленьких водяных капелек, удерживающихся в воздухе так же, как частички дыма. Долгие годы оставалось загадкой, как эти капельки вырастают до размеров, достаточных для того, чтобы упасть на землю. Оставалось загадкой и то, что часто эти капельки «отказывались» за-

---

Опубликовано в «Кванте» №2 за 1972 год.

мерзать, хотя температура облака была намного ниже нормальной температуры замерзания воды, т.е. ниже  $0^{\circ}\text{C}$ .

Сейчас мы знаем, что переохлажденное облако остается стабильным до тех пор, пока в нем не появится хотя бы небольшое количество маленьких кристалликов льда, зарождающихся на частичках земной пыли. Молекулы воды, попавшие на кристаллик льда, образуют с ним прочную связь, разорвать которую довольно трудно. Молекулы же воды, которые конденсируются на капле, оторвать сравнительно легко — теплота испарения меньше энергии, необходимой для отрыва молекулы воды от кристаллика льда. Поэтому если облако состоит из капелек воды и кристалликов льда, то кристаллы льда растут гораздо быстрее, чем капли. Более того, благодаря росту кристалликов льда уменьшается влажность окружающего воздуха. Это приводит к тому, что водяные капли постепенно испаряются и исчезают. В то же время кристаллики льда вырастают до размеров, достаточных для их падения на землю. Падая, несколько кристалликов могут объединяться, образуя снежинку. На рисунке 1 приведены фотографии различных снежинок.

Хотя снежные кристаллы многообразны, их можно классифицировать по трем основным формам: шестиугольные призматические столбики (рис. 2, а), тонкие шестиугольные пластины (рис. 2, б) и разветвленные звезды (рис. 2, в). Нетрудно объяснить шестигранную форму снежных кристалликов и снежинок. Изучение кристаллов льда с помощью рентгеновских

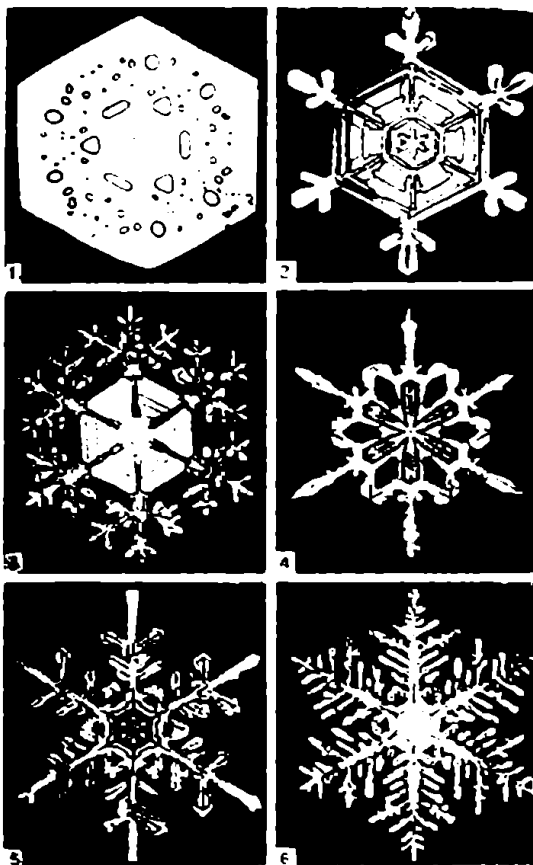
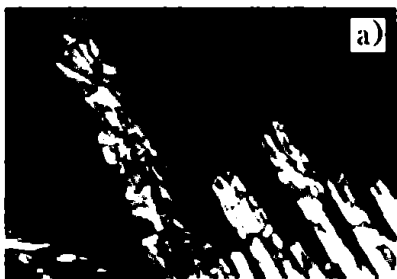


Рис. 1



лучей показало, что молекулы воды в кристалле льда расположены так, что каждая из молекул окружена шестью соседями. Центры этих молекул образуют правильный шестиугольник (рис. 3). Что же касается причин различия форм кристаллов, то до недавнего времени ученые не могли прийти к единому мнению. По некоторым гипотезам форма кристалликов должна определяться в основном степенью пересыщения окружающего воздуха парами воды, а не температурой облака. Но исследования показали, что кристаллы различной формы вырастают именно при разных температурах.

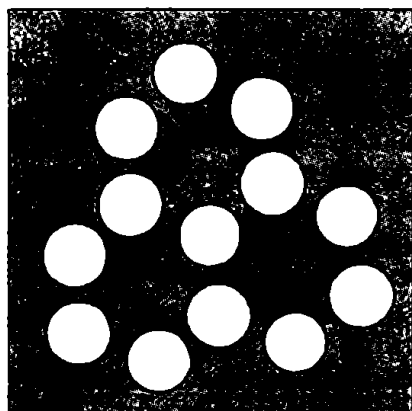
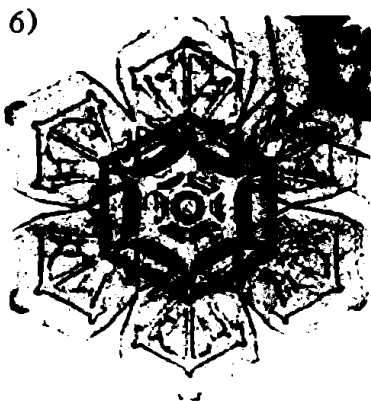


Рис.2

Рис. 3

Высокие перистые облака, температура которых ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ , состоят в основном из снежных кристаллов в форме призматических столбиков длиной около полмиллиметра. Облака на средних высотах, температура которых изменяется от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $-30^{\circ}\text{C}$ , состоят из кристаллов в форме призм и пластин. В низких облаках, температура которых колеблется от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ , можно встретить кристаллы в виде шестиугольных пластин, коротких призм и поражающих своей красотой звезд, имеющих диаметр порядка нескольких миллиметров. Эти звезды являются

основой снежинки. При температуре несколько градусов ниже нуля кристаллики слипаются, образуя снежинки.

Все это говорит о том, что форма кристаллов определяется в основном температурой, при которой они вырастают. Это подтвердили и эксперименты по выращиванию кристаллов льда в лаборатории. Кристаллы льда выращивались в специальной камере, в которой строго контролировалась температура и количество водяных паров. В качестве затравки использовалась тонкая нить. Температура в камере в различных участках вдоль нити была разной. На рисунке 4 показана фотография участка нити, обросшей кристаллами. Размер этого участка около 6 см. Справа на рисунке указана температура в камере. В верхней части нити выростали в основном мельчайшие шестиугольные пластинки. Ниже — шестиугольные призмы, затем шестиугольные пластины, разветвленные звезды и опять шестиугольные пластины. При температурах ниже  $-25^{\circ}\text{C}$  вновь образовывались шестиугольные призмы.

Опыты показали, что именно температура определяет форму кристалла. Количество же водяных паров влияет на скорость роста. Однако до сих пор остается невыясненной точная природа роста снежных кристаллов.

Очень интересно изучение роста снежных кристаллов на земле. Часто зимой при резком потеплении ветки деревьев и стены домов покрываются инеем. Облака, в которых зарождают-

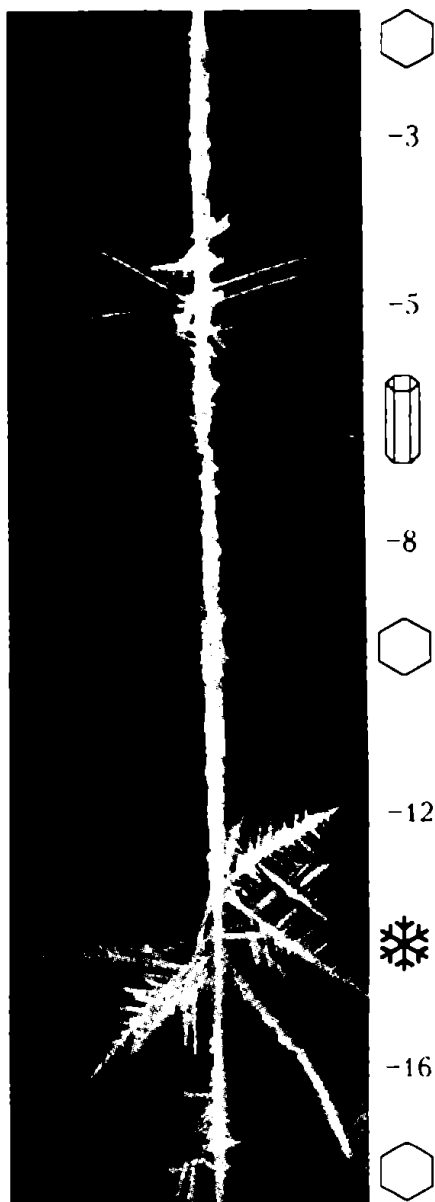


Рис. 4

ся снежинки, трудно доступны. Иней же легко доступен, и за ним можно наблюдать во время его образования. Иней появляется обычно на предметах, имеющих большую теплоемкость и малую теплопроводность. При резком потеплении температура этих предметов оказывается ниже температуры окружающего воздуха, и на них конденсируются водяные пары, находящиеся в воздухе. Если паров в воздухе мало, то получаются красивые пушистые хлопья. При большой влажности воздуха холодные предметы покрываются коркой льда. Вода просто конденсируется на холодных предметах и затем замерзает.

Особенно интересны узоры, которыми покрываются зимой окна квартир, автобусов и трамваев. При резком похолодании температура окон становится ниже температуры воздуха в помещении. На них и оседают молекулы пара, находящиеся во влажном воздухе в комнате, образуя красивые узоры. При этом тоже важно, чтобы воздух в комнате был не очень влажным. В противном случае пар сначала конденсируется на стекле и затем замерзает, образуя слой льда. Узоры не появляются на окне, если открыта форточка. В этом случае температура воздуха в комнате у стекла понижается, став такой же, как температура самого стекла.

Наблюдать за ростом снежных кристаллов на окнах вы можете и у себя дома. Однако, к сожалению, узоры на окнах недолговечны, да и трудно менять условия их роста. Но можно «выращивать» узоры, очень похожие на ледяные, пользуясь не водой, а растворами гипосульфита (он продается в магазинах в отделах фототоваров) или карловарской соли (ее можно купить в аптеке). Эти узоры долговечны, по внешнему виду не отличаются от ледяных и, выращивая их, можно менять условия роста — скорость подвода или отвода тепла, концентрацию раствора (изменение концентрации раствора соответствует изменению влажности воздуха) и т.д. За ростом кристаллов, образующих узоры, можно следить с помощью микроскопа.

Получить узор можно так. Сначала приготовьте насыщенный раствор вещества, с которым вы будете работать. Протрите этим раствором стекло и поставьте его под вентилятор. Примерно через 5 минут вода испарится, а на стекле получится узор. Самое трудное здесь — это хорошо смочить стекло. Дело в том, что обычно вода не смачивает поверхность стекла и не растекается по ней, а образует капельки. Тогда вместо узоров получатся пятна, в которых останется просто высохший осадок. Если не обдуть стекло или налить на него много раствора, то вместо узора вы получите куски кристаллов, они выраст-

тут «снизу» (от поверхности стекла) и будут возвышаться над стеклом. Нам же надо, чтобы кристаллы выросли небольшие и сразу на всей поверхности стекла. Чтобы раствор смачивал стекло, надо поверхность стекла тщательно очистить бензином или спиртом (можно взять и одеколон). Еще лучше пользоваться не водным, а спиртовым раствором соли. Конечно, с первого раза узор может у вас не получиться — не отчаивайтесь. Помните, что любой физический опыт может потребовать нескольких попыток.

Полученные вами искусственные узоры можно и сфотографировать. Удобны два способа фотографирования. Первый — обычный: узоры фотографируются на пленку, а потом печатаются на фотобумагу. Второй — не совсем обычный. Узоры выращиваются на узкой полоске стекла. Эта полоска вставляется в фотоувеличитель вместо пленки, и производится печать прямо на бумагу. Кристаллики, образующие узоры, непрозрачны и в проходящем свете выглядят черными (на отпечатке после проявления — белыми). Места, где кристаллов нет, пропускают свет и на отпечатке получают черными. Именно так был получен узор, помещенный на заставке к статье. Он был выращен из раствора карловарской соли.

*Н. Силаева*

Самые простые колебания тела — это колебания, при которых отклонение  $x$  тела от положения равновесия изменяется по закону

$$x = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $A$  — амплитуда,  $\omega$  — частота,  $\varphi$  — начальная фаза колебаний. Такие колебания называются гармоническими. Гармонические колебания совершают, например, математический маятник, грузик на пружине, напряжение в электрическом контуре.

В этой статье мы рассмотрим случай, когда тело участвует одновременно в двух гармонических колебаниях. Если оба колебания происходят вдоль одной прямой, то уравнение движения тела будет представлено суммой уравнений двух движений:

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2).$$

Нетрудно построить график смещения тела от положения равновесия в зависимости от времени. Для этого нужно сложить ординаты кривых, соответствующих первому и второму движениям. На рисунке 1 показан пример сложения двух гармонических колебаний (тонкие линии синусоид). Пунктирная линия соответствует результирующему колебанию. Оно уже не является гармоническим.

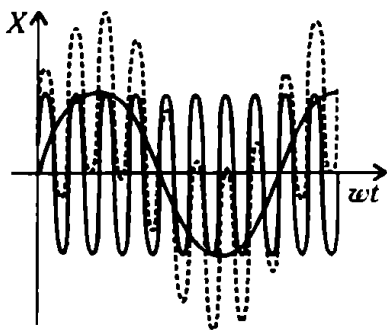


Рис. 1

Более сложные траектории получаются при сложении колебаний в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Примером такого колебания может служить движение тела, изображенного на рисунке 2. В этом случае

---

Опубликовано в «Кванте» №7 за 1972 год.

вид траекторий зависит от соотношения частот, амплитуд и фаз взаимно перпендику-

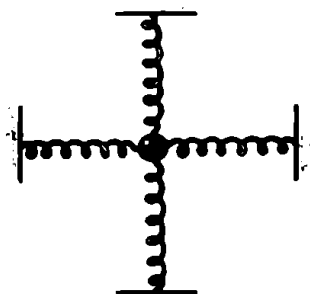


Рис. 2

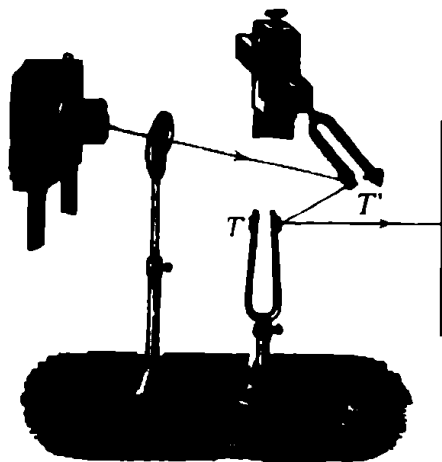


Рис. 3

лярных колебаний. Эти траектории называют фигурами Лиссажу, по имени французского физика Ж. Лиссажу, который в 1863 году впервые описал их. Установка, использованная Лиссажу, показана на рисунке 3. Камертон  $T'$  колеблется в горизонтальной плоскости, камертон  $T$  — в вертикальной. Луч света проходит через линзу и попадает на зеркальце, прикрепленное к камертону  $T'$ , отражается им, попадает на зеркальце, прикрепленное к камертону  $T$ , и после вторичного отражения попадает на экран. При колебании только одного камертона светлое пятно на экране колеблется вдоль прямой линии. Если колеблются оба камертона, пятно может описывать самые замысловатые траектории.

Траектория движения тела в том случае, когда оно одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, описывается системой уравнений

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1),$$

$$y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2),$$

где  $x$  и  $y$  — проекции смещения тела на оси  $X$  и  $Y$ .

Допустим для простоты, что  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$  и  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ . Тогда

$$x = A_1 \sin \omega t, \quad y = A_2 \sin \omega t.$$

Это означает, что  $y = \frac{A_2}{A_1} x$ ; следовательно, уравнения описывают отрезок прямой. Угол наклона  $\alpha$  к оси  $X$  определяется уравнением  $\operatorname{tg} \alpha = A_2/A_1$ .

Пусть теперь  $\varphi_1 = \varphi'_1 + \frac{3\pi}{2}$ . Тогда

$$x = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi'_1), \quad y = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2).$$

Разберем сначала самый простой случай, когда  $A_1 = A_2 = A$ ,  $\varphi'_1 = \varphi_2 = 0$  и  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , т.е.

$$x = A \cos \omega t,$$

$$y = A \sin \omega t.$$

Точка с координатами  $x$  и  $y$ , определяемыми этими уравнениями, описывает окружность радиусом  $A$ . Действительно,

$$x^2 + y^2 = A^2 \cos^2 \omega t + A^2 \sin^2 \omega t = A^2.$$

А это и означает, что траектория движения — окружность.

Допустим, что  $A_1 \neq A_2$ . Построим траекторию движения для случая  $A_1 = 1$ ,  $A_2 = 2$ . В момент максимального отклонения  $x = A_1 = 1$ , т.е.  $\cos \omega t = 1$ ,  $\omega t = 0$  и, следовательно,  $y = 2 \sin \omega t = 0$ . Аналогично, при  $x = 0$   $y = 2$ , при  $x = \frac{\sqrt{2}}{2}$   $y = \sqrt{2}$  и так далее. Построив по этим координатам график, мы получим эллипс, большая полуось которого  $A_2$ , а малая  $A_1$ , т.е. эллипс вытянут по оси  $Y$  (рис.4,а). Нетрудно показать, что при  $A_1 = 2$

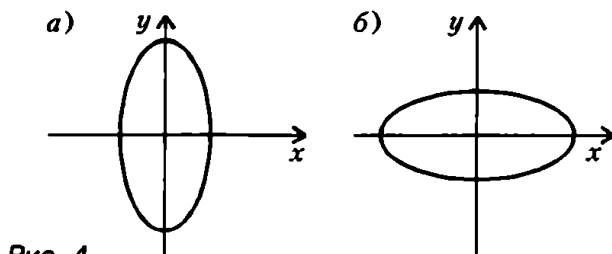


Рис. 4

и  $A_2 = 1$  мы получим эллипс, вытянутый по оси  $X$  (рис.4,б). Таким образом, ясно, что, меняя соотношение амплитуд, можно получать различные эллипсы.

Пусть теперь  $\omega_1 = 2\omega$ ,  $\omega_2 = \omega$ ,  $\varphi'_1 = 0$  и  $\varphi_2 = 0$ . Тогда система уравнений приобретает вид

$$x = A_1 \cos 2\omega t,$$

$$y = A_2 \sin \omega t.$$

Преобразуем уравнение для  $x$  следующим образом:

$$x = A_1 (\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t) = A_1 (1 - 2 \sin^2 \omega t) = A_1 \left( 1 - 2 \frac{y^2}{A_2^2} \right).$$

Эта кривая — часть параболы с осью вдоль оси  $X$  и вершиной в точке  $x = A_1$  (рис.5). Таким образом, мы получили незамкнутую кривую.

Рассмотрим теперь влияние частот на форму траектории, а амплитуды поперечного и продольного колебаний возьмем одинаковыми.

Построим, например, кривые, соответствующие уравнениям

$$\begin{aligned} x &= A \cos \omega t, & x &= A \cos \omega t, \\ y &= A \sin 2\omega t & \text{и} & & y &= A \sin 4\omega t. \end{aligned}$$

Сделать это проще всего так. Возьмем окружность радиусом  $A$  (рис.6), отметим на ней точки, соответствующие углам  $\omega t$ , равным

$$0, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{8}, \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{8}, \frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{8},$$

$$\pi, \dots, 2\pi.$$

Чтобы найти точки с координатами  $x = A \cos \omega t$  и  $y = A \sin 2\omega t$ , вспомним, что в случае окружности единичного радиуса ( $r = 1$ )  $\cos \omega t$  численно равен проекции радиуса-вектора  $r(\omega t)$  на ось  $X$ , а  $\sin \omega t$  — проекции на ось  $Y$ . Так как мы взяли окружность радиусом  $A$ , то координаты  $x$  и  $y$  каждой точки окружности это проекции радиусов-векторов этих точек на оси  $X$  и  $Y$ .

Для обоих случаев получаются замкнутые кривые, число петель которых соответствует отношению  $n = \omega_2/\omega_1$  (рис.7). А фигура, приведенная на рисунке 8, незамкнута. Она соответствует системе уравнений

$$x = \cos 2\omega t,$$

$$y = \sin 3\omega t.$$

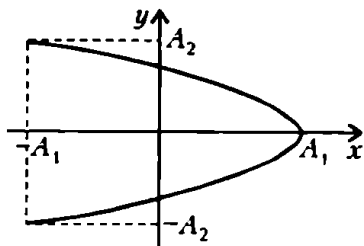


Рис. 5

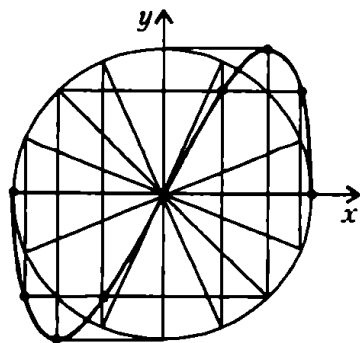


Рис. 6

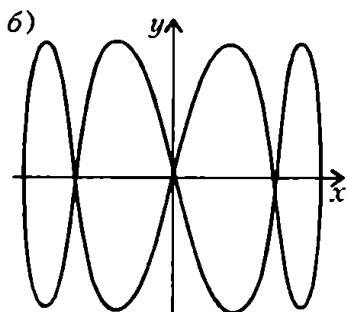
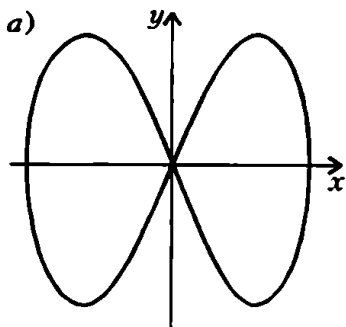


Рис. 7

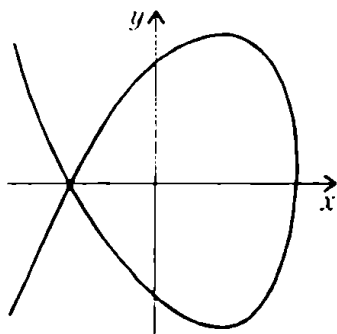


Рис. 8

Заметим, что в той точке, где кривая поворачивает обратно по той же траектории, скорости тела вдоль обеих осей одновременно обращаются в ноль.

Фигуры Лиссажу можно наблюдать на экране осциллографа. На вертикальную развертку подается одно гармоническое колебание, на горизонтальную – другое. Их сумма может принимать разнообразные формы. Для этого достаточно менять ча-

стоту переменного напряжения на обкладках осциллографа. Но можно сделать совсем простое устройство для наблюдения и фотографирования фигур Лиссажу. Возьмите обыкновенную металлическую линейку и изогните ее так, чтобы плоскость одной половины линейки была перпендикулярна плоскости второй ее половины. Один из концов линейки зажмите в тиски (рис.9). Если теперь качнуть свободный конец линейки, он будет описы-

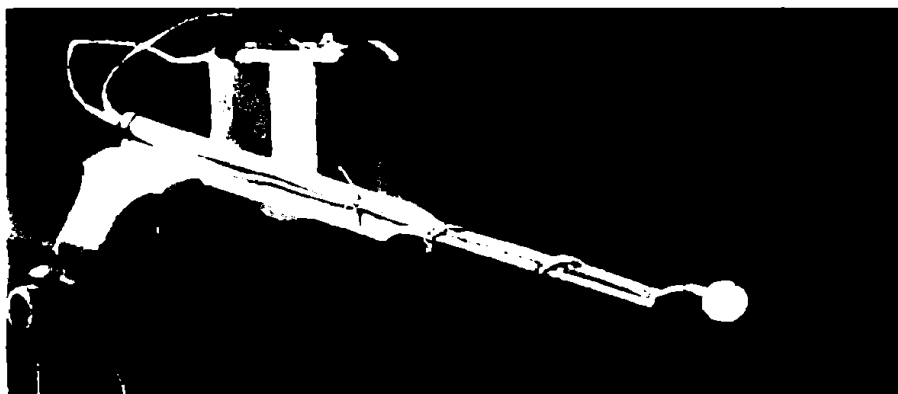


Рис. 9

вать в воздухе замысловатые фигуры. Это и будут фигуры Лиссажу. Движение свободного конца линейки складывается из независимых колебаний двух частей линейки. Одна — от тисков до перегиба и вторая — от перегиба до конца. Колебания каждой части перпендикулярны плоскости линейки на этом отрезке. Поскольку угол перегиба линейки равен  $\frac{\pi}{2}$ , колебания взаимно перпендикулярны.

Вид траектории конца линейки зависит от длины и ширины линейки и от того, в каком месте ее перегнуть. Для получения

разных фигур можно использовать одну и ту же линейку. Чтобы изменять соотношение частот вертикального и горизонтального колебаний, достаточно зажимать линейку в тиски в разных местах. Так как частота колебаний зависит от длины линейки, то, меняя соотношения между длинами частей линейки, вы будете менять соотношения между частотами взаимно перпендикулярных колебаний конца линейки. При этом вы будете получать различные траектории конца линейки.

Чтобы сфотографировать получающиеся фигуры, к свободному концу линейки надо прикрепить маленькую лампочку от карманного фонарика и проводами, протянутыми вдоль линейки, соединить ее с батареей. Поместив этот маятник в темной комнате, можно сфотографировать колебания линейки. Время экспозиции должно быть достаточно велико. Его вы можете определить, проведя несколько опытов с разной экспозицией. На рисунке 10 приведены фотографии, полученные именно таким способом.

Попробуйте провести подобные опыты самостоятельно.

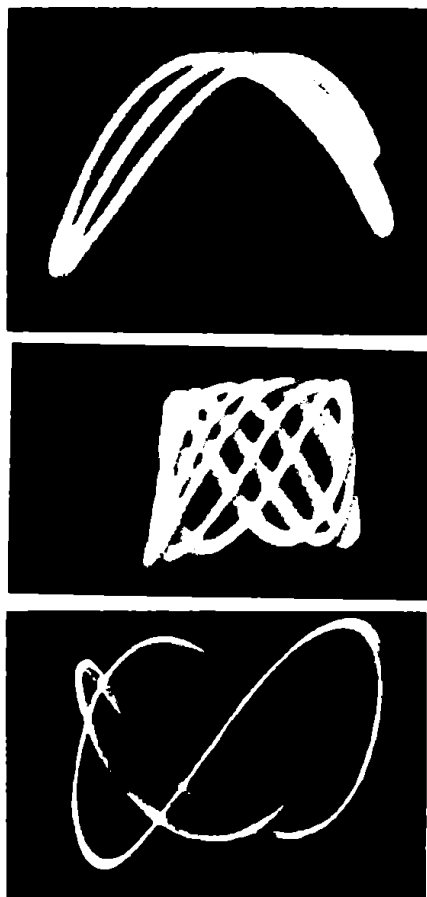


Рис. 10

# БОРНЫЙ ЛЮМИНОФОР

*В. Майер*

Некоторые вещества обладают удивительным свойством. Если их подержать на свету, а потом поместить в темную комнату, то некоторое время они будут светиться. Такие вещества называются люминофорами.

Чтобы приготовить одно из таких веществ, а именно борный люминофор, вам понадобятся хвойный концентрат и порошок борной кислоты. И то и другое можно приобрести в любой аптеке. Возьмите 1 г хвойного концентрата и растворите его в 50 мл воды. Навесьте несколько одинаковых порций борной кислоты (по 2 – 3 г). Если у вас нет весов и мензурки, то равные по объему порции борной кислоты можно отмерить, например, чайной ложкой. А для получения нужного раствора хвойного концентрата постепенно добавляйте концентрат в воду до тех пор, пока зеленоватый раствор не примет отчетливо выраженный желтый оттенок.

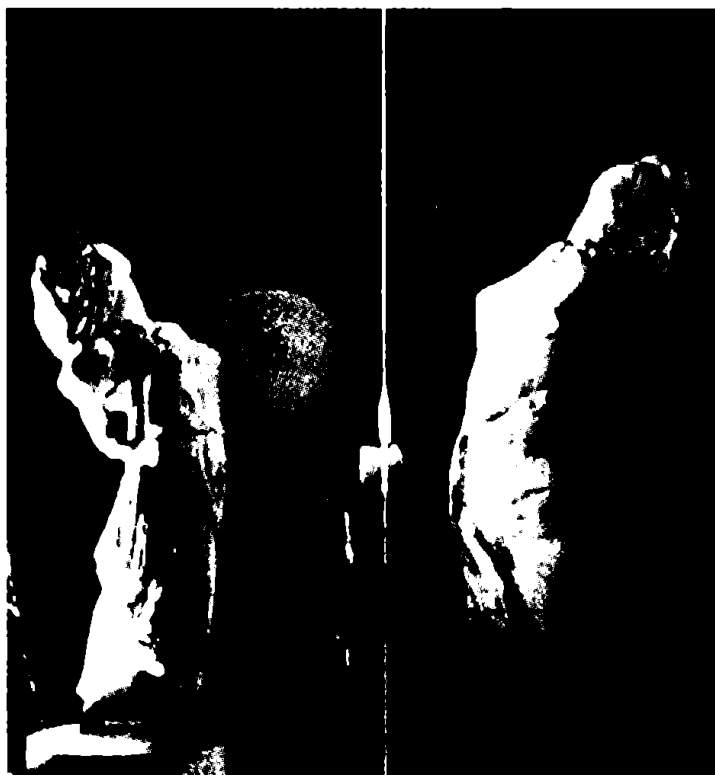
Одну порцию борной кислоты насыпьте на алюминиевую пластинку и капните в нее 10 капель приготовленного раствора хвойного концентрата. Перемешайте все это до получения однородной массы. Получившуюся массу разровняйте на пластинке так, чтобы получился слой толщиной 2 – 4 мм. Положите пластинку на включенную электроплитку. По мере нагревания из массы вначале выпаривается вода, масса затвердевает, затем начинает плавиться. Образующиеся при этом пузыри следует прокалывать заостренной палочкой. Как только вся масса расплавится, удалите расплав с плитки и дайте ему полностью охладиться. Борный люминофор готов.

Поднесите люминофор к горячей лампе. Через некоторое время выключите лампу. В темноте вы можете несколько секунд видеть яркое синеватое или зеленоватое свечение.

Яркость и окраска свечения меняются в зависимости от количества раствора хвойного концентрата, которое вы влили в

---

Опубликовано в «Кванте» №3 за 1973 год.



борную кислоту перед приготовлением люминофора. Поэтому в остальные навески вливайте разное количество хвойного концентрата (например, 20, 30, 40 капель). Приготовьте люминофоры и определите лучшее соотношение. После этого можно пропорционально увеличить составные части и изготовить достаточное количество люминофора.

Теперь с помощью полученного люминофора поставьте опыт, иллюстрирующий важный физический закон. Люминофор на алюминиевой пластинке обычно получается в виде «лепешки». Прикройте половину этой «лепешки» красным светофильтром и, облучив люминофор, выключите свет. Что получилось? Замените красный светофильтр последовательно желтым, зеленым, синим и фиолетовым светофильтрами. Что вы при этом наблюдаете?

При освещении красным, желтым и зеленым светом послесвечение борного люминофора отсутствует. Если же люминофор возбудить синим или фиолетовым светом, то в темноте он испускает зеленый или синий свет. Это наблюдение иллюстрирует закон Стокса, согласно которому длина волны света люминесценции больше длины волны света, вызывающего свечение.

# ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ

*А. Варламов, Д. Казаковцев*

На рисунках 1 и 2 вы видите фотографии кристаллов, выросших в естественных условиях. Эти кристаллы имеют довольно причудливую форму. В природе кристаллы растут на протяжении миллионов лет. А нельзя ли ускорить этот процесс? Оказывается, можно. Промышленность уже давно снабжает технику искусственными кристаллами. Тем интереснее получить их самостоятельно. Именно такую задачу мы и поставили перед собой.

Самый простой, но очень важный метод — выращивание кристаллов из растворов. К нему относится, в первую очередь, выращивание кристаллов путем постепенного снижения температуры раствора. Этот метод основан на свойстве многих кристаллических веществ изменять свою растворимость с изменением

температуры. Он хорош тем, что не требует сложной аппаратуры и позволяет выращивать кристаллы очень многих веществ. Однако он пригоден только для хорошо растворимых соединений. При выращивании кристаллов малорастворимых веществ нужна громоздкая установка, чтобы вместить достаточное количество раствора.

Другой способ — испарение растворителя. При этом создается небольшое пересыщение раствора, за



*Рис. 1*

---

Опубликовано в «Кванте» №6 за 1973 год.

счет которого и идет кристаллизация. Одним из недостатков этого способа является появление кристаллов-паразитов там, где стенки сосуда граничат с поверхностью испаряющегося раствора. Но этот способ очень прост и потому широко используется. Подливая по мере испарения новые порции насыщенного раствора, можно вырастить и кристаллы малорастворимых соединений.

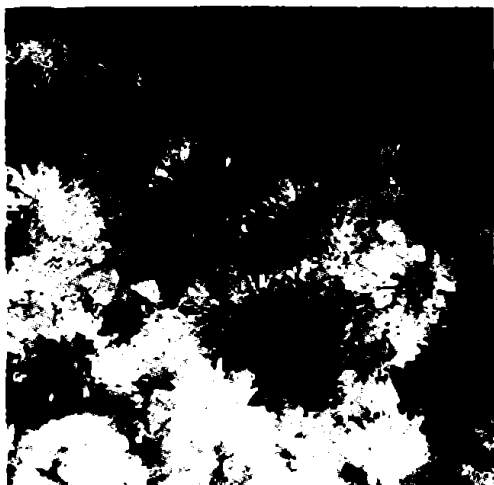


Рис.2

Интересен способ, предназначенный для выращивания кристаллов труднорастворимых соединений в том случае, если существуют два хорошо растворимых компонента, дающих в результате реакции интересующее нас вещество. Оба компонента растворяют в отдельных сосудах. Затем при непрерывном размешивании раствор одного из них при помощи бюретки вводится по каплям в раствор второго. Образующегося при реакции пересыщения достаточно для кристаллизации нужного нам вещества.

Мы выбрали самый простой способ — испарение растворителя. Установка представляла собой сосуд из органического стекла емкостью около 750 мл. В него было налито примерно 600 мл насыщенного раствора медного купороса. По мере испарения в сосуд подливались новые порции раствора. Верхнюю часть стенок мы смазали тонким слоем вазелинового масла, поэтому стенки не смачивались раствором, и кристаллы-паразиты на них почти не появлялись.

Первоначально из поликристаллической массы медного купороса мы отобрали семь кристалликов более или менее правильной формы. Каждый был опущен на тонкой (0,15 мм) леске в сосуд с насыщенным раствором медного купороса. По мере роста удалялись неудачные кристаллы, обросшие паразитами и потерявшие типичную для монокристаллов медного купороса форму. Через две недели остались только три лучших кристалла, а через месяц — всего один. Он был уже довольно велик, поэтому линейный рост его замедлился из-за большой поверхности кристаллизации. Вместо обычного в таких случаях перемешивания раствора мы решили вращать сам кристалл. Для этого подвесили

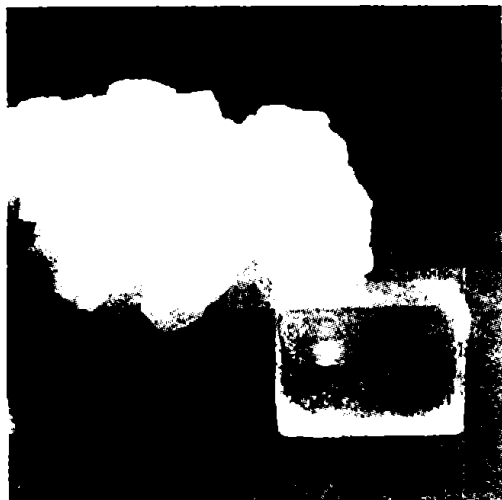


Рис. 3

его на лесе (длиной около 0,7 м), конец которой укрепили на оси микродвигателя. За 10 – 12 секунд работы двигателя леса закручивалась настолько, что после закрепления оси обеспечивала медленное вращение монокристалла в течение примерно полутора часа. На протяжении всего времени эксперимента сосуд был прикрыт целлофаном, чтобы в него не попадала пыль.

Несколько необычно мы получили второй кристалл. Во время более интенсивного испарения (при понижении относительной влажности и повышении температуры) возникало большое пересыщение. Пока сам кристалл был мал, его рост не мог скомпенсировать испарение. Поэтому на неровностях лесы начинали расти кристаллы-паразиты. Один из них нам так понравился, что мы вырастили его отдельно (рис.3). В этом случае не было затравки, внесенной в раствор извне, весь кристалл был выращен в нашем растворе. Полученный кристалл имел более правильную форму, так как он был свободен от дефектов затравки.

# ИГРУШКИ ИЗ КРИСТАЛЛОВ

*М. Головей, Г. Добржанский*

Кристаллы издавна используются для украшений и ювелирных изделий. Они привлекают наше внимание причудливыми формами, сверкающими гранями, переливами цветов и богатством оттенков. Мы хотим научить читателей изготавливать оригинальные и красивые изделия из поликристаллов, вырастить которые не представляет большого труда. При некотором навыке и аккуратности можно стать, например, обладателем удивительной веточки некоего экзотического дерева, состоящей из сверкающих и переливающихся зеленоватым светом небольших кристалликов, или зеленой новогодней елочки, опушенной, как снегом, шапкой белых кристаллов. Познакомившись с методикой и приобретя некоторый опыт, вы и сами сможете придумать, а затем и изготовить различные украшения и сувениры из поликристаллов.

Метод получения таких изделий основан на широко используемом способе выращивания монокристаллов — кристаллизации из водных растворов. При охлаждении насыщенного раствора (а также при испарении растворителя или при пересыщении раствора) растворенное в нем вещество начинает выпадать в осадок. Если в сосуд с раствором (кри-



---

Опубликовано в «Кванте» №1 за 1974 год.

сталлизатор) поместить маленькие кристаллики исходного вещества (затравки) или какие-нибудь посторонние нерастворимые частички, структура которых близка к структуре кристалликов, то при достаточно медленном снижении температуры мы можем добиться того, чтобы вещество осаждалось преимущественно на затравках.

Получение достаточно крупных (размером в несколько сантиметров и более) однородных искусственных монокристаллов требует сложной аппаратуры с точным автоматическим управлением температурой, перемешиванием растворов, регулированием химического состава среды и так далее. Маленькие кристаллики и их сростки (поликристаллы) можно легко получить и не прибегая к сложным конструкциям и автоматике.

Если в кристаллизатор опустить какой-нибудь предмет, на котором находится большое число затравок, то, используя метод снижения температуры или испарения растворителя, можно обрасить его кристалликами с четко выраженной огранкой. При этом нет никакой необходимости перемешивать раствор или точно регулировать скорость изменения температуры. Кристаллики и без этого вырастают достаточно красиво ограненными. Чтобы получить большое число затравок на заращаемом предмете, нужно предварительно обмотать его обычными хлопчатобумажными нитками № 10 (не обязательно плотно,

виток к витку, можно и с интервалом 1—3 мм), окунуть в раствор, тут же вынуть и как следует просушить при комнатной температуре. Так как нитки пропитываются раствором, то при высыхании на них образуются мельчайшие кристаллики, которые и будут в дальнейшем служить затравками.

При желании кристаллами можно легко обрасить любой нерастворимый предмет. Попробуйте, например, изготовить такую веточку, как на рисунке 1. Для этого необходимо из медной или алюминиевой проволоки диаметром 1—2 мм или из какого-



Рис. 1

нибудь синтетического материала сделать ее каркас. Провод необходимо обмотать нитками (если взять провод в хлопчатобумажной изоляции, то никакой дополнительной обмотки не требуется). Для изготовления «заснеженной» елочки (рис. 2) можно также сделать ее каркас из проволоки, но гораздо лучше использовать купленную в магазине разборную синтетическую. У синтетической елочки обматывать нитками нужно только ствол и ветки, а иглы не надо.

Количество раствора в кристаллизаторе и его начальную температуру выбирают с учетом размеров каркаса и массы вещества,

которую нужно на нем осадить. На маленькую елочку достаточно осадить 100—200 г вещества. Масса осадка в данном растворе существенным образом зависит от растворимости выбранного вещества. Мы рекомендуем использовать алюмо-калиевые квасцы (скорее всего, они есть в стандартном школьном наборе химических реактивов в вашем химическом кабинете в школе; их можно также купить в аптеке). Их растворимость при 20 °С около 6%, при 50 °С — приблизительно 19%. Это означает, что в 1000 г насыщенного раствора квасцов при температуре 20 °С на 940 г воды приходится 60 г квасцов, а при 50 °С — на 810 г воды приходится 190 г квасцов. Следовательно, при остывании 1000 г насыщенного раствора от 50 °С до 20 °С в осадок выпадает 130 г квасцов. Из сказанного ясно, что для заращивания елочки кристаллами квасцов вполне достаточно 1,5—2 кг раствора. Не следует брать раствор с очень высокой температурой, так как в этом случае изделие после сушки будет покрыто мелкой кристаллической пылью, что существенно ухудшит его внешний вид. В качестве кристаллизатора можно взять любой стеклянный сосуд с прозрачными стенками.

Горячий раствор отфильтровывается через ватку. Чтобы



Рис. 2

синтетическая елочка не всплывала, в ее круглое основание с помощью пластилина надо вмонтировать металлический грузик, например железную гайку или кусочек свинца. К вершине привязывается нитка, за которую изделие вынимается из кристаллизатора. Уровень раствора в кристаллизаторе должен быть по крайней мере на несколько миллиметров выше каркаса. Сверху кристаллизатор закройте крышкой из картона или полиэтиленовой пленкой. Выпадение осадка протекает сравнительно медленно, поэтому каркас необходимо держать в растворе 10 – 30 часов.

Приведем для сведения характеристики еще нескольких веществ, которые можно использовать для изготовления сувениров из кристаллов. Показанная на рисунке 1 веточка заращивалась сине-зелеными кристаллами никель-аммония сернокислого; растворимость в воде при 20 °С составляет 5,6%, при 50 °С – 12,6%. Можно использовать сернокислый никель (сульфат никеля), его кристаллы темно-изумрудного цвета, растворимость при 20°С – 27%, при 45 °С – 32%.

Очень красивую елочку (см. рис.2) можно получить, если заращивать каркас кристаллами дигидрофосфата калия  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  или дигидрофосфата аммония  $(\text{NH}_2)\text{H}_2\text{PO}_4$ . Кристаллики этих соединений растут в виде прозрачных сильно удлинённых призм и внешне напоминают ледяные сосульки. Растворимости:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  при 20 °С – 18%, при 50° С – 29%;  $(\text{NH}_2)\text{H}_2\text{PO}_4$  при 20 °С – 27%, при 50 °С – 40%. Готовую елочку можно обложить снизу сростками кристаллов, образовавшихся на дне сосуда.

Рыбу, фотографию которой вы видите на заставке к статье, изготовили в одной из лабораторий Института кристаллографии АН СССР в качестве подарка к восьмидесятилетию академика А.В. Шубникова. Сборка каркаса такой рыбы и заращивание его кристаллами потребовали известного мастерства и знаний. Авторы удачно выбрали не только цвет, но и форму кристалликов (дигидрофосфата аммония). На месте глаз у рыбы – маленькие неоновые лампочки марки ТН-0,3, при зажигании которых глаза оживают, начинают мигать розоватым светом, а находящиеся внутри лампочек трубочки создают имитацию зрачков. Если вы будете заращивать кристаллами макет какого-нибудь животного или насекомого, рекомендуем также воспользоваться такими лампочками. Это очень оживит изделие.

# **«ГРИБЫ» ПОД ЛАМПОЧКОЙ И... ВОЙНА В ЗАЛИВЕ**

*Б. Бубнов*

Одной из причин изменения климата в отдельных регионах земного шара является тепловой нагрев «грязной» атмосферы. За счет сильного загрязнения продуктами горения, которые образуются в результате природных или искусственных катализмов (извержения вулканов, пожары, выбросы пыли и земли при сильных взрывах), атмосфера становится непрозрачной для солнечного излучения, что существенно изменяет циркуляцию воздушных потоков. Так, пожары на нефтяных скважинах Кувейта, возникшие в ходе войны в Персидском заливе, изменили климат страны на долгое время, понизив среднюю температуру почти на 10 градусов.

Подобные «натурные» эксперименты, предлагаемые самой жизнью, вызывают необходимость в исследовании похожих явлений в лабораторных условиях. Используемое оборудование очень просто, а эксперименты могут быть воспроизведены дома, для чего вам понадобятся банка с водой, черные чернила и лампочка большой мощности.

Первым делом надо создать «атмосферу» (или «океан»), в которой мы будем наблюдать конвективные потоки. Возьмите прозрачную банку или аквариум, желательно большого объема (форма безразлична). На дно банки установите полость, в которую затем будут налиты чернила. Если дно сосуда плоское, то такой полостью может служить кольцо, прикрепленное к дну пластилином, в крайнем случае края полости можно сделать из пластилина. Не следует делать высоту полости больше 2 — 3 мм, так как большая высота приведет к значительному расходу чернил. От того, как установлена полость, во многом зависит успех эксперимента. Даже небольшой ее наклон может привести к тому, что чернила растекутся по сосуду. Теперь заполним банку водой и дадим ей некоторое время отстояться.

---

Опубликовано в «Кванте» №10 за 1991 год.

Следующий шаг — заполнение полости на дне чернилами. Лучше брать черные чернила, которые ясно показывают конвективные движения и хорошо растворяются в воде. Понятно, что нельзя сначала налить чернила, а потом воду, так как чернила сразу перемешаются с водой. Лучше всего наливать чернила, температура которых ниже температуры воды. В этом случае плотность чернил больше плотности воды, и чернила хорошо растекутся по дну полости. Так что сначала охладите чернила, затем наберите их шприцем или резиновой грушей через трубочку для коктейля, вытрите остатки чернил и, аккуратно подведя трубочку ко дну, медленно вылейте чернила в полость. Затем неспеша выньте трубочку из сосуда. В результате у вас окажется сосуд с водой, на дне которого находится полость, заполненная черными чернилами. (Чтобы достичь совершенной картины, нам потребовалось не один десяток раз повторить эту операцию, но, конечно, для того чтобы «просто посмотреть», достаточно двух-трех попыток.)

Теперь остается включить лампочку и наблюдать за возникающими движениями. Лампу следует поместить на расстоянии 3 — 5 см от поверхности воды и, во избежание взрыва, внимательно следить, чтобы случайные капли воды не попали на нее.

Посмотрим, что же происходит в нашей банке. Под действием света чернила нагреваются, становятся теплее, чем вода, и стремятся подняться. Это — общий принцип так называемой свободной тепловой гравитационной конвекции. Картины конкретных возникших движений и их характеристики будут зависеть от многих параметров, главные из которых — интенсивность светового потока, глубина налитой жидкости и диаметр полости, в которую налиты чернила.



Рис. 1

Рассмотрим основные виды движений, наблюдаемых в этих экспериментах, считая, что световой поток примерно постоянен. Если чернила занимают маленькую площадь на дне, то основное движение представляет собой интенсивный фонтан чернил (рис.1), который при небольшом уровне жидкости в сосуде достигает ее поверхности. Если же уровень жидкости в сосуде велик, то этот одиночный фонтан становится неустойчивым, и на некотором расстоянии от дна образуется утолщение, из которого как бы вырастает новый, кривой фонтан. Этот процесс напоминает падение капли чернил в воде. Падающая в жидкости, капля чернил достигает некоторого положения, при котором движение прекращается или резко замедляется. Через некоторое время из этого положения возникает новое движение капли до следующего стационарного уровня. Если немного увеличить диаметр полости для чернил, то одиночный фонтан будет неустойчив, и поднятие происходит двумя или тремя струями (рис.2). При среднем диаметре полости возникает автоколебательный режим — грибообразное движение (рис.3), при котором струи, составляющие ножку «гриба», то приближаются, то отдаляются от центра. Если площадь чернил на дне совсем большая, то наблюдается хаоти-



Рис. 2



Рис. 3



*Рис. 4*

ческое поднимание отдельных искривленных струй чернил, обычно называемых термиками (рис.4). Такое движение характерно для режима турбулентной конвекции в плоском слое.

Как это часто бывает, простые, с первого взгляда, эксперименты скрывают много непонятных и нерешенных проблем. Эти эксперименты, с одной стороны, позволяют рассмотреть переход от ламинарных движений, образуемых на границах полости, к нерегулярным турбулентным движениям внутри кольца большого диаметра. С другой стороны, процессы, происходящие в пограничных слоях на краях кольца, «задают» движения и внутри его, при этом принципиальную роль играют также вторичные течения, обусловленные боковыми границами. С точки зрения квалифицированного экспериментатора, здесь больше вопросов, чем ответов. А с точки зрения неквалифицированного – просто красиво...

Н.Бурлаки

Эксперименты с вращающейся жидкостью демонстрируют сложные пространственные движения, порой – очевидные, но необъяснимые, порой – невероятные, но поучительные. Большинство из них можно провести в школьной физической лаборатории или в домашних условиях.

**Буря в стакане воды.** Почему чаинки собираются в центре стакана после того, как их раскрутили ложкой? Этот вопрос занимал даже Альберта Эйнштейна, которому и приписывают авторство опыта с чаинками. Не исключено, что здесь сработал «эффект громкого имени», и авторство в объяснении ранее известного явления действительно *было приписано* выдающемуся ученому, но теперь мы не можем с уверенностью сказать, что же было на самом деле. В любом случае объяснение Эйнштейна, опубликованное в 1926 году на страницах журнала «Naturwissenschaften», заслуживает того, чтобы привести его здесь:

«Я начну с небольшого эксперимента, который каждый может легко повторить. Представим себе чашку с плоским дном, полную чая. Пусть на дне ее имеется несколько чаинок, которые остаются там, так как оказываются тяжелее вытесняемой ими жидкости. Если с помощью ложки привести во вращение жидкость в чашке, то чаинки быстро соберутся в центре дна сосуда. Объяснение этого явления заключается в следующем... Слои жидкости, находящиеся по соседству со стенками чашки, задерживаются благодаря трению, так что угловая скорость вращения... будет вблизи дна меньше, чем вдали от него. Результатом этого явится круговое движение жидкости, которое возрастает до тех пор, пока под влиянием трения не станет стационарным. Чаинки сносятся в центр круговым движением, что и доказывает его существование».

В своем письме к Эйнштейну один из основоположников квантовой механики Э.Шредингер, называя это объяснение

---

Опубликовано в «Кванте» №2 за 1992 год.

«очаровательным», не удержался от весьма нестандартного комплимента основателю теории относительности: «Случайно, несколько дней тому назад, моя жена расспрашивала меня о «феномене чашки чая», но я не сумел дать разумное объяснение. Она говорит, что теперь никогда не сможет перемешивать чай, не вспоминая Вас».

Но вернемся непосредственно к опыту с чайниками. Хотя точного расчета движения чаинок не имеется, качественные соображения просты. «Мокрые» чаинки, плотность которых больше плотности воды, находятся на дне стакана и поэтому при своем движении испытывают силу трения о стекло. Вращаются

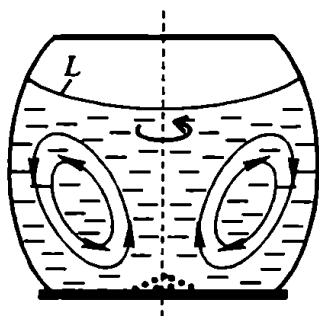


Рис. 1

они не в центре сосуда, а вблизи него, образуя как бы «пояс астероидов». Ширина «пояса» зависит от степени неоднородности чаинок: чаинки разных размеров и масс вращаются по окружностям разных радиусов. Лишь на заключительной стадии торможения они собираются в центре. Этому способствуют восходящие вблизи оси сосуда токи, показанные на рисунке 1 круговыми линиями и образующиеся вследствие того, что при уменьшении

скорости вращения свободная поверхность  $L$ , имевшая форму параболоида вращения, стремится стать снова плоской. Чаинки увлекаются придонным потоком, направленным к оси сосуда.

«Опыт» с чайниками мы проводим каждый день, но не обращаем на их поведение особого внимания. Давайте проведем этот столь хорошо знакомый нам опыт еще раз и попытаемся выяснить, как ведут себя в процессе движения и на его заключительной стадии не только те чаинки, которые находятся на дне стакана, но и те, которые плавают внутри объема и на поверхности воды («сухие» чаинки). Вместо чаинок можно взять другие частицы, желательно калиброванные. Воду можно раскрутить ложкой, оставляя стакан неподвижным. Возможен и другой способ «закручивания» жидкости – можно раскрутить стакан просто в ладонях (при достаточной ловкости) или поставив его на середину вращающегося диска проигрывателя.

Итак, возможны следующие варианты проведения опыта с чайниками: фиксировать их положение во время вращения или после него, раскручивать чай или стакан и, наконец, наблюдать за придонными, поверхностными или плавающими внутри объема частицами. Всего  $2 \times 2 \times 3 = 12$  комбинаций. Впрочем, суще-

ствуется много других вариантов этого на вид простого, а по своей природе чрезвычайно сложного опыта.

**Вихри Тейлора.** Не менее интересно наблюдать за поведением жидкости, находящейся между двумя коаксиальными цилиндрами. Течение жидкости, вызванное вращением одного или обоих цилиндров, представляет собой сложное гидродинамическое явление. При малой скорости вращения (малой закрутке) течение в любой горизонтальной плоскости одинаково, т.е. не зависит от вертикальной координаты. С увеличением закрутки возникают так называемые ламинарные (упорядоченные) вихри Тейлора. Фотография вихрей Тейлора при течении машинного масла в зазоре между неподвижным стеклянным и вращающим-



Рис. 2

ся металлическим цилиндрами приведена на рисунке 2 слева. Для визуализации течения в масло добавлен алюминиевый порошок. Схема течения дана на рисунке 3, направление движения частиц показано стрелками. С дальнейшим ростом скорости вращения появляется периодическое искривление вихрей Тейлора. Наконец, при еще большей скорости на периодическое течение накладывается хаотическое движение (рис. 2, справа). Такие вихри называют турбулентными.

**Закрученные потоки.** В 1931 году было открыто неожиданное явление, заключающееся в следующем. В специальной камере, имеющей круглое выходное отверстие, закручивают воздух, сжатый до 10 атмосфер. По выходе из отверстия температура воздуха на оси и на периферии оказывается различной. Если на периферии

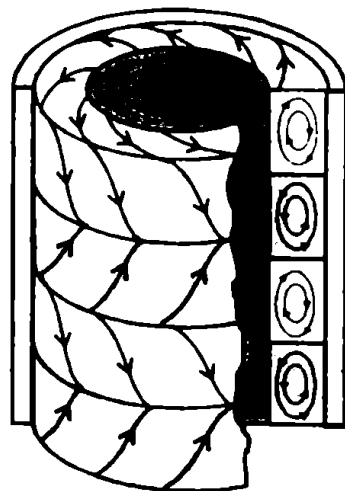


Рис. 3

воздух комнатной температуры, то на оси его температура падает до минус 200 градусов Цельсия! Это явление называется эффектом Ранка. В настоящее время природа этого явления до конца не выяснена, хотя исследованию эффекта Ранка посвящаются много работ, созываются специальные симпозиумы. Поиск продолжается...

Поскольку эффект Ранка в условиях школьной лаборатории наблюдать нельзя, так как для его осуществления нужна специальная камера, проведем эксперимент, легко воспроизводимый даже в домашних условиях и чем-то напоминающий опыт Ранка. Этот опыт демонстрирует взаимодействие вращательного и поступательного движений жидкости, вытекающей из вращающегося сосуда (рис.4).

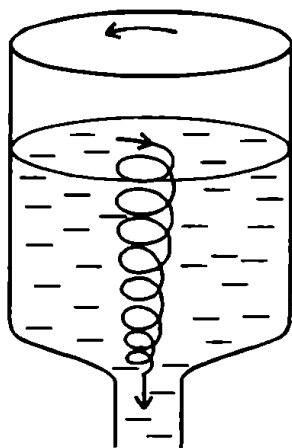


Рис. 4

Предлагаемый эксперимент можно поставить следующим образом. Сосуд с водой укрепите на подшипниках так, чтобы он мог свободно вращаться вокруг своей оси, раскрутите его, а затем снимите крутящие усилия и одновременно откройте сток в дне. После этого скорость вращения сосуда начнет заметно возрастать.

Форма свободной поверхности в этом опыте зависит от скорости вращения и от высоты жидкости  $H$  в сосуде. Если скорость вращения мала или велико значение  $H$ , на свободной поверхности образуется небольшая впадина (рис.5). С увеличением скорости вращения или с уменьшением  $H$  вихрь достигает дна сосуда, а затем проникает в вытекающую из отверстия струю. Подобные воронки можно наблюдать в реках, а также при спуске воды в ванной.

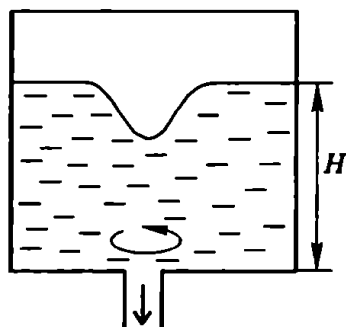


Рис. 5

**Взрыв вихря.** В 1957 году американские ученые Пекхем и Аткинс обнаружили необычное явление – внезапное разрушение спиральных вихрей (взрыв вихря), сходящих с боковых кромок самолетного крыла. Наблюдать этот необычный эффект можно только в условиях научно-исследовательской лаборатории, поэтому мы лишь расскажем об этом интересном явлении и приведем его фотографии.

Модель треугольного крыла самолета устанавливают в потоке жидкости (или воздуха) под некоторым углом к направлению течения. С нижней плоскости крыла частицы жидкости устремляются на верхнюю, где давление меньше, и движутся по потоку вдоль крыла, образуя отходящие от его боковых кромок спиральные вихри. Почти прямые оси вихрей (визуализированные с помощью впрыскиваемой вблизи вершины крыла жидкой краски) искривляются, обретая нерегулярную форму (рис.6).

Это во многом загадочное явление изучают в специальных вихревых камерах, где поток воды закручивается искусственным

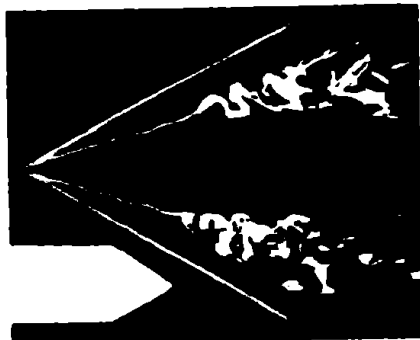


Рис. 6

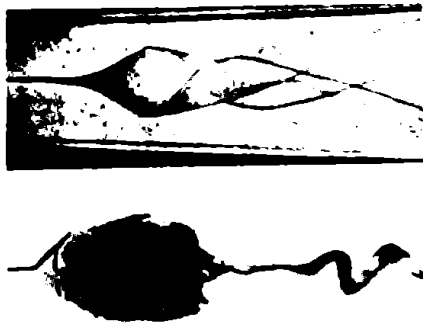


Рис. 7

образом, например лопастями вентилятора (в данном случае модель крыла отсутствует), а по оси камеры вводится краска. При малой скорости вращения потока образуется спиральная структура, фотография которой показана на рисунке 7 сверху; при большой скорости осевая линия приобретает «пузыревидную» форму (рис.7, внизу). Таковы два основных типа взрыва вихря.

**Наблюдение пророчицы Деборы.** Не только в опытах с вращающейся жидкостью, но и в любых других ситуациях, где проявляется влияние вязкости, следует различать два типа жидкостей: ньютонову и неньютонову.

Жидкости и газы, состоящие из «легких» молекул с относительно малыми молекулярными массами не более 1000, называют ньютоновыми. К ним относятся воздух и вода при наших земных условиях. Классическая гидродинамика описывает движение ньютоновой жидкости.

«Тяжелые» жидкости – неньютоновы – состоят из огромных молекул, каждая из которых представляет собой цепь из большого числа повторяющихся звеньев. Примером являются полимерные жидкости, молекулярная масса которых  $10^5 - 10^8$ . Это

растворы синтетических и биологических полимеров и неразбавленные полимеры, называемые «расплавами». Сюда относятся полиэтилен  $(-\text{CH}_2-)_n$ , полистирол  $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-)_n$ , натуральный каучук  $(-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$  и т. д. (Здесь  $n$  – очень большое число порядка  $10^3 - 10^6$ .)

Неньютоновы жидкости обладают рядом особенностей. Например, они имеют память. Дело в том, что время, характерное для процесса перестройки длинных молекул, может превышать время наблюдения за течением жидкости. Течение не успевает перестроиться, имеет место эффект запаздывания, а значит – эффект памяти.

Как утверждает библейская мифология, пророчица Дебора изрекла, что пред Богом текут даже горы. Она первая подметила аналогию между поведением жидких и твердых тел. Но что самое важное – Дебора ясно выразила идею разных временных масштабов. За время своей жизни человек не заметит уменьшения горы – оно незначительно. А по временной шкале Бога горы текут! Ученые часто шутят – юмор помогает им в трудной работе. Числом Деборы они называли отношение характерного времени «настройки» молекул к времени наблюдения. Когда число Деборы велико, жидкость ведет себя подобно твердому телу. При малых числах Деборы жидкость ведет себя как ньютонова. В промежуточном случае, когда число Деборы порядка 1, жидкость обладает рядом аномальных свойств.

**Удивительные свойства неньютоновых жидкостей.** Двигаясь в трубе, жидкость испытывает силу трения о ее поверхность, в результате чего кинетическая энергия переходит в тепловую. Поэтому снижение силы трения является важной технической проблемой. Как оказалось, добавление в жидкость малого количества полимера значительно снижает силу трения. Это удивительное и до конца не понятое явление называется эффектом Томса. Всего лишь 20 миллионных долей полиокса (длинноцепочного полимера) могут снизить силу трения турбулентного потока в трубе на 50 %!

В 50-е годы [прошлого столетия] американские пожарные начали добавлять полимерные добавки в жидкость, вытекающую из брандспойта, при этом длина струи увеличивалась в полтора раза. Полимерные добавки в смазывающих материалах повышают ресурсы станков и приборов. Можно увеличивать скорость судна путем впрыскивания вблизи его носовой части малых количеств полимерного раствора. Имеется гипотеза, что дельфины и другие обитатели морей и океанов тоже «использу-

ют» эффект Томса для уменьшения гидродинамического сопротивления.

Теперь, подготовленные к неожиданностям, снова перейдем к теме нашей беседы – опытам с вращающейся жидкостью. Сравним, как поведут себя ньютоновы и неньютоновы жидкости, оказавшись в одинаковых условиях. В наших опытах в качестве ньютоновой жидкости можно использовать воду, а в качестве неньютоновой – подсолнечное масло.

Вставьте во вращающийся стакан с водой неподвижный стержень, ось которого совпадает с осью стакана. Свободная поверхность не утратит форму параболоида вращения. Если же вместо воды взять подсолнечное масло, то жидкость поднимется в центре стакана. Свободная поверхность уже не будет параболоидом. Опыт можно изменить: вращать не стакан, а стержень. Эффект будет тот же самый. Подобная картина возникает, если убрать стержень, а на дно стакана поместить вращающийся диск.

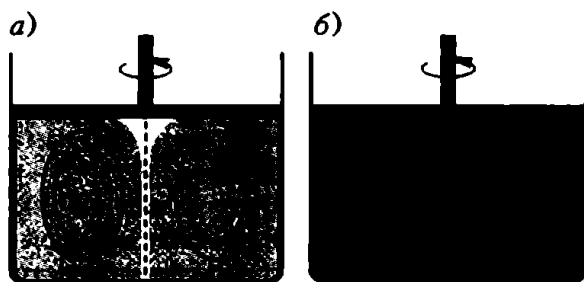


Рис. 8

Свободная поверхность ньютоновой жидкости в центре опускается, неньютоновой – поднимается. Если вращающийся диск разместить на поверхности жидкости, то наряду с первичным потоком, скорость которого направлена по касательной к диску, возникнет вторичный поток в меридиональном направлении (рис.8). В ньютоновой (а) и неньютоновой (б) жидкостях направления вторичного течения противоположны.

# ШАРИК С ДЫРКОЙ В СТРУЕ ПЫЛЕСОСА

С. Кузьмин

Наверное, многим доводилось наблюдать, как шарик для пинг-понга устойчиво висит в воздушной струе, созданной феном или пылесосом. Давайте немного изменим этот опыт. Возьмем деревянный шарик, например от детской пирамидки, и просверлим в нем вдоль оси отверстие диаметром порядка сантиметра. Если такой шарик поместить в струю, то сначала он просто парит в воздухе, а потом начинает раскручиваться, причем так, что дырка вращается в вертикальной плоскости. Частота вращения при этом достигает ста оборотов в секунду, а высота поднятия шарика оказывается примерно в пять раз больше, чем вначале (сравните рисунки 1,а и 1,б). (Измерение частоты вращения в нашем опыте производилось следующим образом: в поверхность шарика был вделан маленький магнит, а сам шарик помещался в катушку индуктивности, ЭДС индукции с которой выводилась на осциллограф.) Такой же опыт можно провести с другими

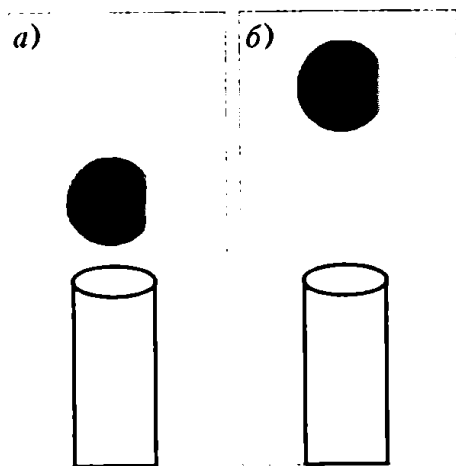


Рис. 1

шариками — тоже сплошными, но просверленными иначе (рис.2). Во всех случаях наблюдается эффект вращения и подъема, однако у шарика со смещенным отверстием вращение происходит не в одной и той же плоскости (с прецессией, как говорят научным языком). По-видимому, это связано с изменением положения центра тяжести шарика относительно его геометрического центра. Для опытов можно использовать и пустотелые шарики (для

Опубликовано в «Кванте» №3/4 за 1993 год.

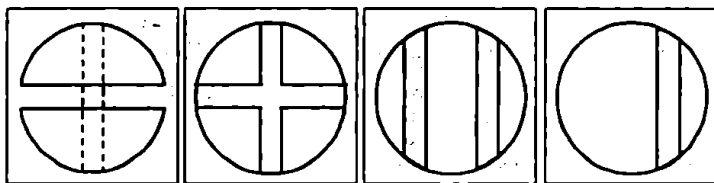


Рис. 2

пинг-понга) с отверстиями. Правда, вращаются они медленнее и поднимаются на меньшую высоту. Однако если в отверстие вставить бумажную трубочку, то вращение ускорится. Все эти опыты показали, что очень важным является проток воздуха через дырку. Если отверстие закрыть, например пластилином, то вращение прекращается.

Чтобы лучше понять «устройство» потока воздуха вблизи вращающегося шарика, можно трубу пылесоса обклеить длинными нитками и сфотографировать шарик со вспышкой (например, обычным «Зенитом»). Вы увидите, что поток «прижимается» к шарiku с той его стороны, которая движется по потоку, и «отталкивается», отклоняясь в сторону, с противоположной стороны. При этом шарик смещается относительно центра струи.

Попробуем дать возможное объяснение опыта. Сначала рассмотрим случай с совершенно гладким шариком без дырки. Он будет висеть в струе устойчиво, даже если струю немного наклонить. Это объясняется тем, что, в соответствии с законом Бернулли, давление в струе меньше, чем в окружающем воздухе, поэтому стоит только шарiku сместиться, как на край, выходящий за пределы струи, начинает действовать сила, возвращающая его обратно. Теперь перейдем к вращающемуся шарiku. Если бы он вращался в центре струи, то скорости, а следовательно, и давления с разных сторон шарика были бы разными, так как вращающийся шарик с одной стороны тормозит поток, а с другой стороны ускоряет его. И тогда возникла бы сила, смещающая шарик в сторону. Но поскольку наш шарик висит на месте, средние давления с разных сторон от него должны быть равны. Из этого следует, что вращающийся шарик должен быть смещен от центра струи, так как равенство скоростей с разных сторон от него возможно только в этом положении (скорость в струе убывает с удалением от центра, а это значит, что край, находящийся в центре струи, должен двигаться против потока, а противоположный край — по потоку).

А почему же шарик вращается? Опять начнем рассуждения с шарика без дырки, который висит точно на оси потока и не вертится. Стоит этот шарик сместить в сторону, как с внешней

стороны воздух начинает «тереться» о большую площадь поверхности, чем с другой стороны, и шарик приходит во вращение в вертикальной плоскости. Если шарик отпустить, он возвращается в свое равновесное положение на оси струи, и вращение прекращается. Шарик с дыркой в аналогичном опыте ведет себя иначе — наличие дырки делает его вращение устойчивым и без внешнего воздействия. Дело в том, что отверстие изменяет

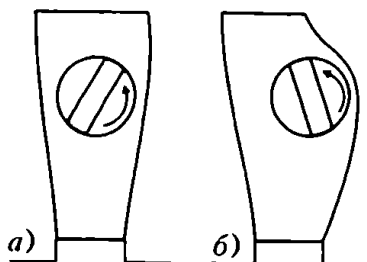


Рис. 3

структуру потока вокруг шарика. В течение четверти оборота, показанной на рисунке 3,а, струйка, вырывающаяся из дырки, создает облако маленьких вихрей. Эти вихри затрудняют отрыв потока, чем позволяют ему дольше стелиться вдоль поверхности шарика. При этом как бы увеличивается вязкость воздуха и связанная с ней сила трения. Во время фазы вращения, изображенной на рисунке 3,б, этот эффект отсутствует, так как поток успевает оторваться раньше. Таким образом возникает момент силы трения, закручивающий шарик. А это, в свою очередь, обуславливает возникновение поперечной силы — силы Магнуса, которая смещает устойчивое положение шарика относительно оси потока.

Дополнительный подъем шарика с дыркой можно связать с тем, что в некоторых положениях сила, смещающая шарик от центра струи, направлена не горизонтально, а имеет вертикаль-

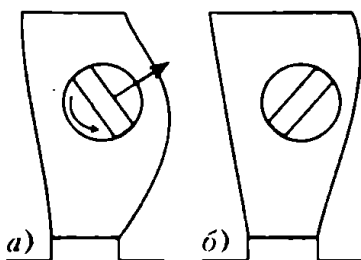


Рис. 4

ную составляющую (рис.4,а). Воздух, проходящий через дырку, как бы подсасывает всю остальную струю, вызывая ее перекося. Этого не происходит в противоположном положении (см. рис.4,б), так как здесь ничто не мешает потоку оторваться от шарика.

А теперь попытаемся сделать некоторые оценки. На шарик по вертикали действуют три силы: сила тяжести, сила сопротивления воздуха и вертикальная составляющая силы Магнуса. Силу сопротивления можно записать в виде  $F_c = k\rho v^2 S$ , где  $k$  — коэффициент сопротивления, зависящий от формы тела,  $\rho$  — плотность воздуха,  $v$  — скорость набегающего потока,  $S$  — площадь лобового сечения шарика. Силу Магнуса можно оценить по порядку величины из закона Бернулли. Пусть цилиндр

длиной  $l$  и диаметром  $d$  вращается с линейной скоростью  $u$  по часовой стрелке в безграничном потоке газа, движущегося со скоростью  $v$ . Тогда справа от цилиндра будет скорость  $v - u$ , а слева  $v + u$ . По закону Бернулли, разность давлений на цилиндре

$$\Delta p = \rho \frac{(v + u)^2}{2} - \rho \frac{(v - u)^2}{2},$$

а сила Магнуса  $F_M \approx \rho v u d l$ . Для грубой оценки шарик можно представить цилиндром длиной порядка диаметра, а линейную скорость вращения шарика считать равной скорости потока. Чтобы получить вертикальную составляющую силы Магнуса, нужно умножить ее на синус так называемого угла перекоса струи (судя по всему, угол  $\beta$  составляет примерно 4 – 5 градусов). Тогда для шарика получаем

$$F_M \approx \rho d^2 v^2 \sin \beta.$$

Изменение скорости в струе с высотой можно оценить из закона сохранения импульса. Поскольку в нашем случае статическое давление и плотность воздуха в струе меняются незначительно, в приближенной форме этот закон запишем так:

$$v_1^2 S_1 \approx v_2^2 S_2.$$

Сечения струи можно выразить через высоты  $h_1$  и  $h_2$  и угол расхождения струи. Тогда

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{h_1}{h_2}$$

Надо заметить, что начало струи находится не в месте ее выхода из трубы, а в вершине угла ее расхождения, поэтому высота отсчитывается от этой вершины, а не от кромки трубы.

Таким образом, из условия равновесия шарика по вертикали:

$$mg = F_c + F_M$$

можно выразить высоту подъема шарика:

$$h_2 \approx h_1 d v_1 \sqrt{\frac{\rho (k + \sin \beta)}{mg}}.$$

Здесь  $h_1$  и  $v_1$  – высота и скорость струи на выходе из трубы, которые легко измерить. Наши оценки давали высоту подъема шарика порядка 30 см, что вполне соответствовало опытным результатам.

Н. Паравян

**Цветная прерывистая линия.** Все знают, что переменный ток – это ток, периодически изменяющийся по величине и направлению. Вы хотите на опыте убедиться в том, что он в самом деле «периодически изменяющийся по направлению»? Оказывается, это возможно, и не очень сложно.

Соберите установку, схематически изображенную на рисунке 1. К деревянной доске или листу фанеры прикрепите обычными

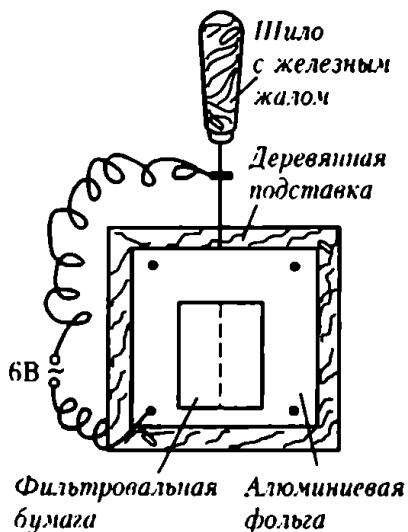


Рис. 1

канцелярскими кнопками кусок алюминиевой фольги. К одной кнопке припаяйте медный изолированный провод. Другой такой же провод присоедините (например, пластмассовой или деревянной бельевой прищепкой) к железному «жалу» обыкновенного шила. Оба провода соедините с клеммами вторичной обмотки понижающего (220 / (6–10)) трансформатора. Не вздумайте включать установку прямо в сеть, без трансформатора: неизбежно произойдет короткое замыкание со всеми вытекающими отсюда неприятностями!

Возьмите полоску фильтровальной бумаги (в крайнем случае – полоску газетной бумаги), смочите ее 10%-ым раствором хлорида аммония (нашатыря), в котором растворено 0,3 г роданистой либо желтой кровяной соли, и наложите бумагу на фольгу. Включите установку в цепь переменного тока (напоминаем – через трансформатор) и быстро, но не очень сильно нажимая, проведите шилом вдоль листа

---

Опубликовано в «Кванте» №1 за 1994 год.

бумаги. На бумаге появится отчетливо видимая цветная прерывистая линия – розово-красная в случае роданистой соли или синяя в случае желтой кровяной соли. Почему прерывистая?

Дело в том, что в растворе, которым смочена фильтровальная бумага, имеются ионы, прежде всего  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{Cl}^-$ . Когда включают ток, в течение одного полупериода шило становится анодом, на котором разряжаются ионы хлора:  $2\text{Cl}^- - 2e^- \rightarrow \text{Cl}_2$ . Тут же хлор образует с железом хлорид железа:  $2\text{Fe} + 3\text{Cl}_2 = 2\text{FeCl}_3$ . А хлорид железа дает с роданидом или желтой кровяной солью окрашенные продукты розово-красного или синего цвета.

Когда же ток проходит в обратном направлении, анодом становится алюминиевая фольга, и образуется бесцветный хлорид алюминия:  $2\text{Al} + 3\text{Cl}_2 = 2\text{AlCl}_3$ , не дающий цветных реакций с находящимися в растворе ионами. Значит, на нашей линии будет «пробел». Потом направление тока опять изменяется – анодом становится железо, и снова появляется окрашенная линия, и т.д. Вот и получается прерывистая линия с правильно чередующимися черточками и пробелами между ними.

**Электролитические часы.** Известно множество различных «часовых механизмов», созданных самой природой. Бывают геологические часы, биологические, химические. А можно сделать и электролитические часы. И вот как.

Возьмите небольшой сосуд, лучше всего прямоугольную плоскую кювету (рис.2). Налейте в сосуд на  $2/3$  его высоты насыщенный раствор поваренной соли. Вырежьте из куска жести, например от железной, но не алюминиевой! консервной банки, два электрода почти такой же высоты, как и сосуд, и с помощью деревянных палочек погрузите электроды в раствор. К обоим электродам припаяйте изолированные медные проводки. Один



Сосуд с электролитом

Рис. 2

проводок соедините с клеммой понижающего трансформатора. Второй проводок соедините с одной клеммой амперметра переменного тока на 5 А, а другую его клемму соедините со второй клеммой трансформатора.

Итак, наша установка состоит из последовательно включенных источника переменного тока, сосуда с раствором поваренной соли, в который опущены два электрода, и амперметра. Включи-

те установку в сеть и внимательно следите за происходящими в банке явлениями, а также за показаниями амперметра. Вы увидите, что сила тока в цепи постепенно растет, а жидкость возле поверхности электродов начинает закипать – появляется самый настоящий водяной пар (точнее, туман). Через некоторое время кипение усиливается до бурного, сила тока достигает максимума и... вдруг резко падает почти до нуля. Одновременно прекращается и кипение. Вскоре ток снова начинает расти, кипение усиливается до бурного, вслед за чем процесс опять почти полностью приостанавливается. Так продолжается до тех пор, пока вы не выключите установку из сети. И в самом деле – настоящие часы, только электролитические. Как же объяснить это периодическое кипение жидкости и одновременное периодическое изменение силы тока в цепи?

Раствор поваренной соли имеет значительное сопротивление и при пропускании через него электрического тока разогревается. Да так сильно, что закипает. Из-за все увеличивающегося количества пузырьков пара электроды через некоторое время (определенный временной интервал) практически полностью изолируются от жидкости (пар – диэлектрик). Тогда цепь размыкается, кипение прекращается – электроды снова начинают контактировать с раствором. И опять начинается кипение, и т.д. Ну, а почему увеличиваются показания амперметра? При нагревании раствора уменьшается его электрическое сопротивление, что, по закону Ома, естественно влечет за собой увеличение силы тока в цепи.

А теперь продолжите ваш эксперимент. Выключите трансформатор из сети, оставьте в растворе один жестяной электрод, а второй совсем удалите. Вместо него к клемме трансформатора присоедините очень тонкую голую медную или железную проволочку диаметром 0,5 мм или даже еще меньше. Оберните проволочку липкой изоляционной лентой и, придерживая за нее проволочку, включите трансформатор в сеть. Коснитесь свободным концом проволочки поверхности электролита и постепенно опустите его на глубину порядка сантиметра. То, что начинается в растворе, даже нельзя назвать кипением – процесс сопровождается свечением раскаленного конца проволочки, эффектными вспышками желтого пламени и резким периодически повторяющимся трескучим звуком. И это нетрудно объяснить.

Во-первых, из-за того что проволочка тонкая, она сильно раскаляется. Правда периодичность накала глазу незаметна, так как частота прерывания тока в этом случае очень большая. Во-вторых, в нашей системе, состоящей из одного очень большого

электрода и другого очень маленького, возникает как бы односторонняя проводимость электрического тока, т.е. происходит частичное выпрямление переменного тока. В результате начинается электролиз раствора поваренной соли. При этом водород, выделяющийся на маленьком электроде (проволочке), смешивается с мельчайшими капельками раствора хлорида натрия и вспыхивает желтым пламенем с резким звуком. Кроме того, на поверхности раскаленной проволочки при высокой температуре водяной пар разлагается:  $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Образующаяся смесь водорода и кислорода (гремучий газ) от малейшей искры также вспыхивает, точнее – взрывается с сильным звуком.

А можно ли будет наблюдать все эти эффекты, если воспользоваться не переменным, а постоянным электрическим током? Взяв выпрямитель электрического тока, дающий постоянное напряжение 6 – 10 В, вы можете убедиться в том, что все эти явления будут еще более эффектными – ведь параллельно будет происходить еще и электролиз водного раствора хлорида натрия.

И последнее. Если у вас не окажется амперметра переменного тока – не беда. Возьмите вместо него электрическую лампочку, например на 6 – 10 В и 5 – 10 Вт. С ее помощью вы обнаружите ничуть не меньший эффект.

*И. Воробьев*

**Струя слабая и сильная.** Если спрашивают: какая струя воды — слабая или сильная — быстрее заполнит ложку доверху, знайте, что в вопросе есть подвох. В очень сильной струе ложка вообще останется практически пустой, а слабая струя заполнит ложку даже чуть выше краев. Впрочем — обо всем по порядку.

Проведите опыт, и вы убедитесь, что от слабой струи идет почти горизонтальная поверхность воды, которая заворачивается у края, вода по внешней поверхности стекает к середине ложки и снова образует струю. Нижняя струя не очень устойчива — она



чувствительна к месту попадания исходной струи, к наклону и чистоте ложки. Может образоваться даже несколько струй с дальнейшим распадом их на капли.

Сильная же струя от места попадания растекается тонким слоем, который продолжается за края ложки изящным обширным «сводом», обрамленным снизу «бахромой» струек и капель. Такое пленочное выплескивание в целом понятно. У падающей воды достаточно энергии, чтобы «взбежать» на край с ненулевой скоростью. А дальше в сво-

---

Опубликовано в «Кванте» №4 за 1994 год.

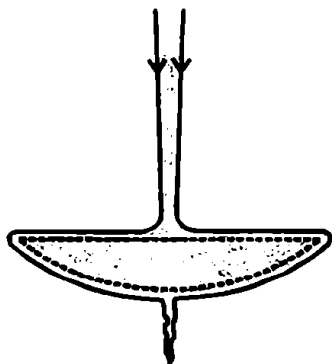


Рис. 1

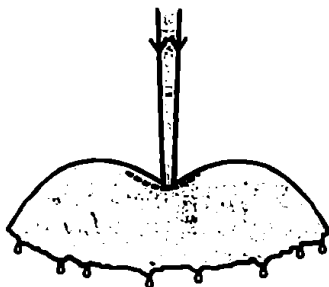


Рис. 2

бодном полете сливающиеся водяные струйки образуют тончайшую изогнутую поверхность.

Все сказанное хорошо иллюстрируется рисунками 1 и 2.

Будем считать, что траектории отдельных участков воды независимы и каждая представляет собой параболу, т.е. движение происходит только под действием силы тяжести.

Тогда нетрудно оценить горизонтальную скорость  $v$  на линии вершины свода (рис.3). За время полета  $t$  от края ложки до

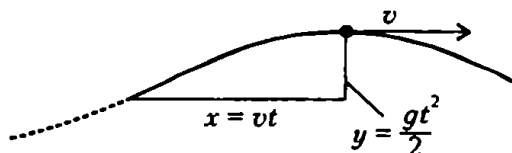


Рис. 3

вершины смещение по горизонтали составляет  $x = vt$ , а по вертикали —  $y = gt^2/2$ . Отсюда, измерив  $x$  и  $y$ , находим скорость:

$$v = x \sqrt{\frac{g}{2y}}.$$

В одном из типичных измерений оказалось, что  $x = 10$  см,  $y = 4,5$  см и  $v \approx 1$  м/с.

Чтобы выяснить, существенны или нет потери энергии при ударе и трении об «опору», скорость  $v$  уместно сравнить со скоростью  $u$  в струе из крана на том же уровне, что и вершина параболы. По времени заполнения стакана (объемом порядка 200 мл) измерим ежесекундный объемный расход воды  $q = \pi r^2 u$ , где  $r$  — радиус струи. Тогда

$$u = \frac{q}{\pi r^2}.$$

В упомянутом случае получилось  $u \approx 1,4$  м/с.

Скорости  $v$  и  $u$  не совпадают, но довольно близки. Значит, при грубых оценках потерями энергии можно пренебречь.

Теперь вернемся к слабой струе. И в этом случае при падении воды в ложку энергии заведомо хватает, чтобы вода «выскочила» из ложки, однако этого не происходит. Кто же гасит скорость почти полностью — ведь потери при ударе и трении об опору это не обеспечивают? Стоит повнимательнее рассмотреть переход от спокойного вытекания через край к пленочному выплескиванию.

**Торможение о «стену».** Как показывает опыт, даже при осторожном приоткрывании крана выплескивание наступает неожиданно. Поэтому советуем не трогать кран при умеренной струе, а плавно опускать ложку вблизи дна раковины. Интересно, что результат сильно зависит от предыстории. Так, если вы

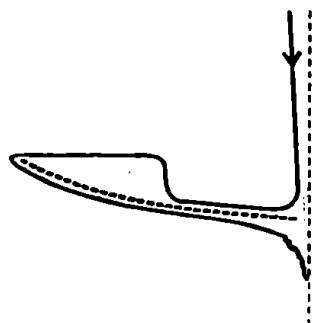


Рис. 4

добились выплескивания и подняли ложку на несколько сантиметров вверх, то вода продолжает «вылетать» за края ложки. Но как только вода заполнит ложку, для того чтобы образовался свод, мало вернуться в исходную точку — надо опустить ложку еще ниже.

Если ложка относительно мелкая, а вы достаточно внимательны, то можно добиться ситуации, когда от падающей струи почти по дну ложки идет впадина, заканчивающаяся крутой водяной

стенкой, за которой вода спокойна, ее поверхность горизонтальна и чуть превышает края ложки (рис.4). Струя достаточно сильна, чтобы «сдуть» воду вблизи места встречи с ложкой, но недостаточно сильна, чтобы опустошить ложку полностью.

Ступенчатый переход от быстрого течения в тонком слое к почти неподвижной воде за крутым выступом удобнее наблюдать в случае более простого профиля дна, чем у ложки. Вполне годится, например, зеркало средних размеров с невысоким бортиком.

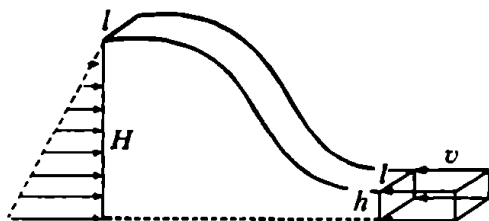


Рис. 5

В этом случае при усилении или ослаблении струи просто плавно меняется радиус впадины — области быстрого растекания. Высота водяной стены  $H$  почти совпадает с высотой бортика и много больше толщины  $h$

набегающего тонкого слоя быстрой воды перед выступом (рис.5). Ее скорость  $v$  гасится в узкой области крутого подъема (где можно заметить бурление воды).

Рассмотрим объем, ограниченный вертикальными торцами площадью  $Hl$  и  $hl$ , и применим к нему второй закон Ньютона. За единицу времени сюда со скоростью  $v$  входит масса воды  $\rho vhl$  (где  $\rho$  — плотность), а на некотором расстоянии за стеной ее скорость падает почти до нуля. Таким образом, какие-то силы приводят к ежесекундному уменьшению импульса на величину  $\rho v^2 hl$ . Какие же?

Оказывается, это силы давления со стороны почти неподвижной воды. (Трением о дно мы пренебрегли из-за малой протяженности по горизонтали области подъема. Силы, возникающие в бурлящей на ступеньке воде, являются внутренними и на суммарный импульс не влияют. Не существенны и силы поверхностного натяжения.) На глубине  $H$  давление превышает атмосферное на  $\rho gH$ , но для расчета силы нужно взять среднее избыточное давление, тогда

$$F = \frac{\rho g H}{2} Hl = \frac{\rho g H^2 l}{2}.$$

Эта тормозящая сила и равна ежесекундному уменьшению импульса. Отсюда получаем важнейшее для нас соотношение

$$v^2 h = \frac{g H^2}{2}, \quad (*)$$

которое можно рассматривать как условие неподвижности границы крутого подъема. А что произойдет, если сильнее приоткрыть кран или опустить горизонтальную опору? Тогда величина  $v^2 h$  увеличится и превзойдет  $g H^2 / 2$ , водяная стена поддастся под напором быстрой воды, и ступенька начнет двигаться по направлению течения. Скорость ступеньки можно рассчитать, исходя опять же из второго закона Ньютона и условия сохранения массы воды. Если же водяная стена своим давлением превосходит напор быстрой воды, т.е.  $g H^2 / 2 > v^2 h$ , то ступенька побежит навстречу течению, и будет расширяться область почти остановившейся воды. (Таким образом, подъем морской воды во время прилива «запирает» устье реки и вызывает появление крутой ступеньки, бегущей против течения реки, — так называемый бор.)

**Радиус растекания.** В наших условиях соотношение  $(*)$  не очень удобно для количественной опытной проверки: толщина  $h$

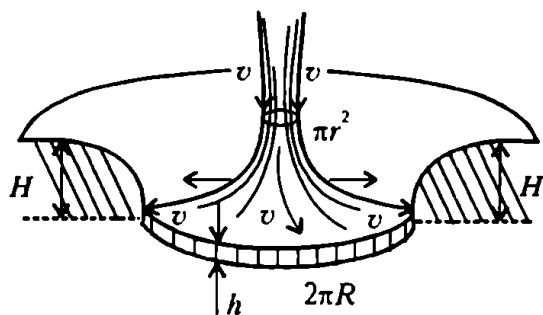


Рис. 6

слишком мала, трудно измерить и скорость воды  $v$ . Поэтому избежим обходной путь. Попробуем поточнее измерить диаметр струи  $2r$  в самом узком месте — «шейке» — на высоте порядка  $H$  от горизонтальной опоры и радиус кругового выступа  $R$  (рис.6). Будем также считать, что в области плавного растекания трение и небольшой перепад высот не повлияют на скорость воды.

Одно и то же количество воды проходит через «шейку» и через цилиндрическую границу с выступом, высота которой  $h$ , а длина окружности  $2\pi R$ . Поэтому

$$q = \pi r^2 v = 2\pi R h v.$$

Отсюда (по объемном расходу) находим скорость:

$$v = \frac{q}{\pi r^2}$$

и толщину слоя растекающейся воды на расстоянии  $R$  от оси струи:

$$h = \frac{r^2}{2R}.$$

Подставляем эти значения в соотношение (\*) и получаем радиус растекания:

$$R = \frac{1}{g} \left( \frac{q}{\pi r H} \right)^2.$$

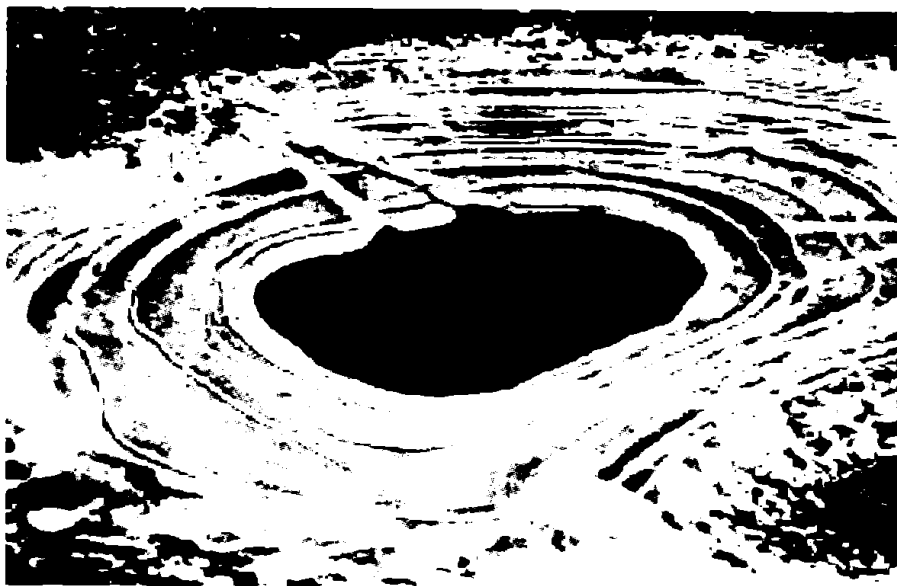
По нашим измерениям при  $q = 52$  мл/с,  $r = 3,5$  мм и  $H = 6$  мм рассчитанное значение  $R$  оказалось равным 9 см, а непосредственно измеренное — 6 см. Расхождение примерно в полтора раза. Как нам представляется, это различие связано, в основном, с допущением постоянства скорости на сравнительно протяженном пути растекания в тонком слое. Если посчитать, например, что уменьшение скорости составляет 40%, то с такой поправкой получается очень неплохое количественное согласие. Надеемся, ваши опыты это тоже подтвердят.

# ЗАМЕРЗАЮЩАЯ ЛУЖА

*А. Миранский, А. Шапиро*

Поздней осенью по утрам часто можно видеть лужи, покрытые прозрачной корочкой льда. А задумывались ли вы над тем, что же происходит в луже при ее замерзании? Давайте немного поговорим об этом.

Понятно, что понижение температуры воздуха первыми «замечают» верхние слои воды. По мере охлаждения они становятся плотнее и опускаются вниз. Их место занимает более теплая вода. Но такое перемешивание происходит только до тех пор, пока температура воды не понизится до  $+4^{\circ}\text{C}$ . Как известно, плотность воды при этой температуре и нормальном давлении максимальна и принята равной единице (см. таблицу). При дальнейшем понижении температуры верхние слои воды уже не могут сжиматься, и, постепенно охлаждаясь до нуля градусов, вода



---

Опубликовано в «Кванте» №4 за 1995 год.

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ г/см}^3$
0	0,999867	3	0,999992	10	0,999727	70	0,977808
1	0,999926	4	1,000000	30	0,999672	90	0,965343
2	0,999968	5	0,999992	50	0,988960	100	0,958375

начинает замерзать. Такое поведение воды связано со своеобразием ее внутреннего устройства.

Молекула воды, состоящая из двух атомов водорода и одного атома кислорода, нелинейна, ее кристаллографическая модель выглядит примерно так, как показано на рисунке 1. (Современная физика методами оптической спектроскопии и рентгеноструктурного анализа позволяет точно определять углы и длины связей в молекулах.) Вследствие того что электронные облака атомов водорода в молекуле воды электростатически оттянуты к атому кислорода, молекула обладает электрической асимметрией и характеризуется определенным дипольным моментом (величиной, отвечающей за электрические свойства системы заряженных частиц). Именно наличие дипольного момента является причиной возникновения упорядоченной структуры в чистой жидкой воде — под действием электростатических сил каждая

молекула воды стремится связаться водородной связью с четырьмя соседними молеку-

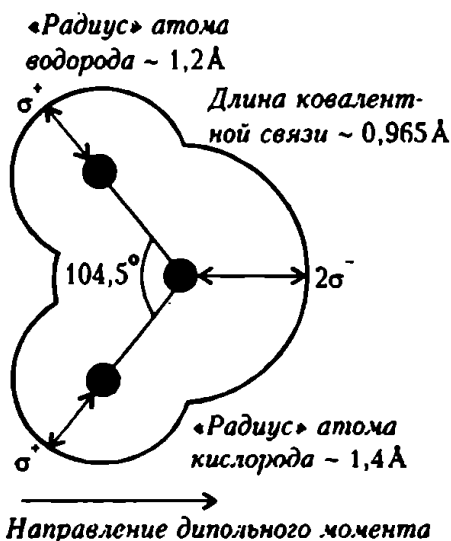


Рис. 1

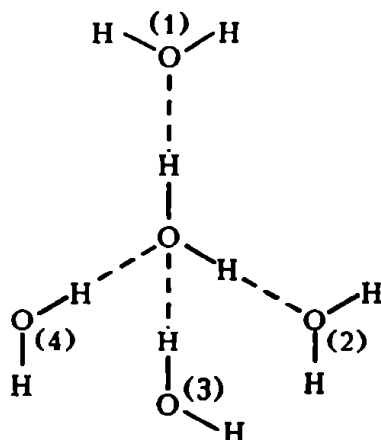


Рис. 2

лами (рис.2). Водородные связи между молекулами воды возникают не только в жидкой фазе, но и в кристаллах льда, и в водяном паре.

Длина водородной связи в кристаллах льда составляет  $1,77 \text{ \AA}$ , а среднее расстояние между атомами кислорода в соседних молекулах  $2,76 \text{ \AA}$ . Из-за явного расхождения этих величин структура льда неплотная, в ней имеются пустоты, соизмеримые с размерами самих молекул. При плавлении льда его кристаллическая решетка разрушается, возрастает число молекул со свободными связями, которые заполняют пустоты, поэтому плотность воды при повышении температуры от  $0$  до  $+4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  увеличивается. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению расстояний между молекулами и средних расстояний между самими атомами внутри молекулы, что и обуславливает уменьшение плотности воды при температуре выше  $+4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Поздней осенью по ночам температура воздуха опускается ниже  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , а днем заметно повышается. При таких колебаниях дневных и ночных температур около  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  образовавшийся за ночь на поверхности лужи лед днем подтаивает. Следующей ночью процесс намерзания нового слоя льда на месте подтаявшего повторяется. В результате сверху поверхность льда оказывается ровной, а снизу нет. Нижняя поверхность льда на замерзающей луже очень похожа на поперечный срез ствола дерева: в обоих случаях отчетливо видны концентрические кольца. Но если ширина древесного кольца может рассказать о *годовой* температуре, то ледяные кольца показывают изменение *суточной* температуры: чем ниже была ночью температура, тем большая поверхность лужи покрывается льдом. К сожалению, следы ледяного цикла недолговечны.

Итак, с течением времени границы кольца то подтаивают, то подмерзают, и на поверхности льда появляются утолщения вдоль границы вода — лед. Свет отражается от слоев льда разной толщины по-разному, вот почему на поверхности замерзшей лужи отчетливо видны незатейливые суточные кольца (см. фотографию на заставке). Ширина образующегося кольца, толщина льда и время замерзания лужи зависят от многих факторов — скорости изменения температуры, наличия ветра, освещения прямыми солнечными лучами, теплопроводности почвы, глубины и профиля дна лужи, наличия примесей в воде и т.д. Например — чем выше теплопроводность дна лужи, тем быстрее она замерзает; лужа на асфальте замерзает скорее, чем лужа на песчаной почве и т.п. Обычно лужа начинает замерзать

от краев. Это связано с тем, что глубина воды у берега меньше, а площадь образующихся колец с приближением к центру уменьшается.

А теперь — эксперименты. Смоделируем «лужу», используя пластиковые ячейки прямоугольной формы, заполненные водой (для получения кубиков льда в домашнем холодильнике), и исследуем на этой модели некоторые особенности процесса замерзания лужи. Прежде всего можно исследовать зависимость времени полного замерзания «лужи»  $t$  от объемной концентрации твердых примесей  $C$  (рис.3), в качестве которых мы использовали смесь земли с песком. Как следует из результатов модельных исследований, при наличии твердых примесей в воде

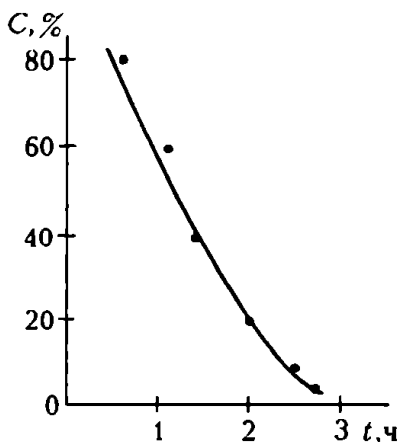


Рис. 3

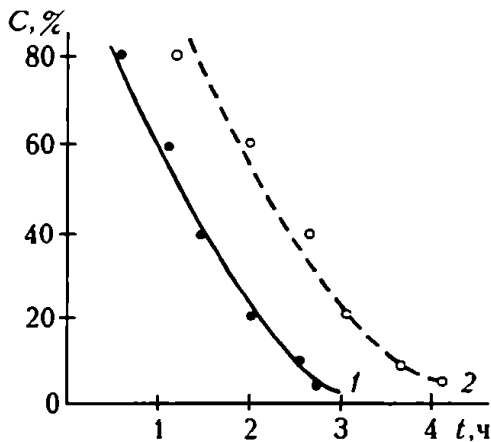


Рис. 4

замерзание происходит быстрее по сравнению с чистой водой в том случае, когда процентное отношение примесей превышает 20%. Если же оно составляет не более 10%, то время замерзания чистой воды и воды, содержащей твердые примеси, практически одно и то же.

Во второй части эксперимента исследовалось влияние начальной температуры воды на время замерзания «лужи». Результаты эксперимента показаны на рисунке 4 — для кривой 1 начальная температура  $T_0 = 0$  °С, для кривой 2 —  $T_0 = 20$  °С. Вид кривых замерзания «лужи» в обоих случаях сходен, но кривая 2 смещена параллельно кривой 1 в направлении оси абсцисс на  $\Delta t$  порядка одного часа.

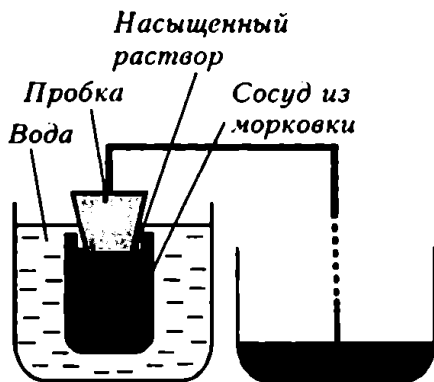
# ОСМОС И... ВЕЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

*Н. Паравян*

Представьте себе, что некоторый раствор отделен от своего растворителя полупроницаемой перегородкой — она пропускает маленькие молекулы растворителя, но задерживает более крупные молекулы растворенного вещества. Очевидно, что из-за естественного стремления к выравниванию концентрации по всему объему будет происходить односторонняя диффузия молекул растворителя. Такой самопроизвольный переход растворителя в раствор, отделенный от него полупроницаемой перегородкой, называют осмосом. Говорят также, что растворитель проникает в раствор под действием сил осмотического давления. Другими словами, осмотическое давление служит количественной характеристикой явления осмоса.

Осмотическое давление можно измерить — оно равно избыточному давлению, которое нужно приложить со стороны раствора, чтобы осмос прекратился. И экспериментально, и на основе молекулярной теории растворов было установлено, что осмотическое давление пропорционально концентрации раствора и абсолютной температуре. Было бы интересно проверить это, но как? Ведь для экспериментов нужен специальный прибор — осмометр, которого нет в школьном физическом кабинете.

Однако выход есть: надо изготовить самодельный осмометр. Возьмите самую обыкновенную морковь длиной 10–12 сантиметров и диаметром 3–4 сантиметра. Тщательно вымойте ее, поскобли-



---

Опубликовано в «Кванте» №5 за 1995 год.

те и аккуратно обрежьте хвостик и верхушку. С помощью сверла для пробок (его можно позаимствовать на время из химического кабинета) аккуратно высверлите из морковки серединку так, чтобы толщина стенок образовавшегося «стаканчика» составила 3—8 миллиметров. Если нет пробочного сверла — не беда: скальпелем или узким (например, перочинным) ножиком вырежьте серединку из морковки. Вместо морковки можно использовать свеклу, репу, брюкву, картофель — все, что окажется под рукой. Теперь подберите к такому сосуду резиновую пробку с отводной стеклянной или полиэтиленовой трубкой. В принципе, наш осмометр готов (см. рисунок), и можно начинать эксперименты.

Налейте в сосуд до краев насыщенный раствор любого вещества, растворимого в воде (поваренной соли, аптечного сульфата натрия — глауберовой соли, сахара, если не жалко для науки), и плотно закройте пробкой с отводной трубкой. Обязательно проследите, чтобы под пробку не попали пузырьки воздуха, иначе этот воздух окажет серьезное «противодействие» осмосу. Наполненный сосуд поместите в стакан с водопроводной водой, а чтобы не держать его в руках, с помощью лапки присоедините прибор (за пробку) к металлическому лабораторному штативу. Обратите внимание на то, чтобы уровень воды в стакане был выше уровня раствора в морковном цилиндрике.

Уже через несколько минут из отводной трубки в заранее подставленный пустой сосуд вследствие осмоса начнет выливаться жидкость. А примерно через 30 — 40 минут уровень воды в наружном стакане заметно понизится. Интересно, долго ли это может продолжаться? На первый взгляд, никаких ограничений нет — ведь в наружный стакан можно все время подливать чистую воду. Но это — только на первый взгляд. На самом деле этот опыт, как бы долго он ни продолжался, все-таки закончится, и вот почему. Вода будет просачиваться через полупроницаемую перегородку (стенки морковного «стаканчика») в наш осмометр, но при этом концентрация раствора в нем будет постепенно уменьшаться. Кроме того, вытекание жидкости из осмометра тоже понижает концентрацию растворенных в нем веществ (концентрированный раствор уходит — чистая вода приходит). Так что когда концентрации растворенных веществ во внешнем стакане и внутри морковного сосуда сравняются, жидкость перестанет вытекать из нашего прибора, и опыт прекратится.

Заметим, что в такой постановке опыт может продолжаться довольно долго (2 — 3 часа). Однако процесс все-таки закончится. Так что вечный двигатель на явлении осмоса не построить.

# НЕСКОЛЬКО СЛОВ О МИРАЖЕ

*А. Митрофанов*

Многие, наверное, слышали, что такое оптический мираж, или читали о нем (например, рассказ «Старое и новое о миражах» в книге Я.И.Перельмана «Занимательная физика» (ч.1)). А кто-то, быть может, и наблюдал это интересное явление жарким летом над нагретым асфальтом или раскаленной пашней, которые при определенных условиях начинают отражать предметы, как зеркальная гладь озера.

В чем причина оптического миража? Нагретый от земли приповерхностный слой воздуха имеет меньшую плотность и, следовательно, меньший показатель преломления, чем более холодные верхние слои атмосферы. Явление полного отражения света от слоисто-неоднородной среды с переменным показателем преломления и приводит к тому, что есть такое красивое явление — мираж. Как большинство природных явлений, оптический мираж можно смоделировать. (Об этом подробно и интересно рассказано, например, в книге В.В.Майера «Полное отражение



---

Опубликовано в «Кванте» №6 за 1995 год.

света в простых опытах» – М.: Наука, серия «Библиотечка физико-математической школы», 1986.)

А знаете ли вы, что оптическое явление, подобное миражу, можно наблюдать непосредственно, без всяких дополнительных приспособлений, просто рассматривая окружающие предметы через обычное оконное стекло у себя дома или сидя в электричке? Правда, для этого необходимо, чтобы стекло было с дефектами, т.е. чтобы в стекле были какие-либо неоднородности – их называют «свили». Мираж, наблюдаемый через обычное оконное стекло с еле заметным горизонтальным свилем, показан на фотографии. На ней видно, что трубы на крыше здания как бы расслаиваются и отражаются в неведомом зеркале (естественно – в перевернутом виде). Поверьте, такую картину наблюдать не менее интересно, чем любоваться миражами в пустыне, сидя на верблюде и мечтая о кружке холодного компота или глотке пепси-колы.

Теперь дело за малым – попробуйте объяснить возникновение «оконного» миража. А заодно – ответить на такие вопросы: почему трудно получить качественные фотоснимки, фотографируя предметы длиннофокусным телеобъективом через оконное стекло; почему стекло для оптических приборов и светофильтров должно быть очень однородным?

*Н. Паравян*

Для каждого ферромагнетика существует некоторая вполне определенная температура, выше которой исчезают его ферромагнитные свойства и он превращается в парамагнетик. Одновременно скачкообразно изменяются и другие характеристики ферромагнитного материала, например удельная электропроводность и теплоемкость. Это явление открыл и исследовал (для железа) в 1895 году выдающийся французский физик Пьер Кюри, в честь которого «переходную» температуру и назвали точкой (температурой) Кюри.

Значения точки Кюри для разных ферромагнетиков различны: для железа это примерно  $770^{\circ}\text{C}$ , никеля  $\approx 360^{\circ}\text{C}$ , кобальта  $\approx 1130^{\circ}\text{C}$ . Все это, конечно, величины большие и, главное, очень трудно достижимые в школьном эксперименте. Однако есть некоторые сплавы, для которых температура Кюри значительно ниже. Так, у сплава, состоящего на 30% из никеля и на 70% из железа (по массе), она около  $80 - 85^{\circ}\text{C}$ , т.е. немного ниже температуры кипения воды. А у платинита — сплава, состоящего на 44 — 45% из никеля и на 56 — 55% из железа, она немного выше — порядка  $110 - 120^{\circ}\text{C}$ . Но где взять этот самый платинит?

Оказывается, можно воспользоваться перегоревшей лампочкой накаливания: два блестящих стерженька внутри лампочки, на которых держится вольфрамовая спираль, как раз и сделаны из платинита. (Этот сплав имеет такой же температурный коэффициент расширения, как платина и стекло, и в лампочке заменяет платину в качестве материала для токовыводов, впаиваемых в стекло.) Извлечь стерженьки из перегоревшей лампочки можно так. Осторожно нанесите напильником или стеклорезом (алмазным надфилем) в нижней части лампочки, возле цоколя, небольшую царапину (только царапину, не надо пилить лампочку напильником!). Затем коснитесь царапины жалом сильно

накаленного паяльника и держите его до тех пор, пока царапина не превратится в трещину. Теперь ведите паяльником по окружности вслед за трещиной так, чтобы она опоясала лампочку, — верхняя часть лампочки бесшумно отвалится сама собой. Отломите один платинитовый стерженек — он-то нам и нужен — и готовьтесь ставить сам опыт.

С помощью прочной веревки подвесьте подковообразный постоянный магнит к лапке лабораторного металлического штатива и снизу замкните его полюса

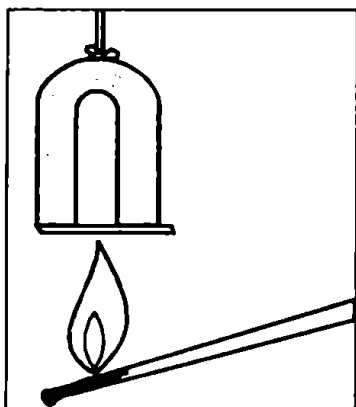


Рис. 1

платинитовым стерженьком (рис. 1). Поднесите к стерженьку горящую лучину — через несколько секунд, когда он прогреется до соответствующей температуры, стерженек отпадет от магнита. При этом магнитные свойства самого магнита не изменились, так как точка Кюри для его материала значительно выше. Посмотрите — магнит как ни в чем не бывало притягивает любые ферромагнитные предметы. Когда наш стерженек охладится до комнатной температуры, его ферромагнетизм

восстановится, и он снова сможет притягиваться к тому же магниту. Убедитесь в этом сами.

Недостаток этого опыта заключается в том, что мы не можем здесь определить (даже приблизительно) величину температуры Кюри. Но если у вас есть хотя бы очень небольшой стерженек из железоникелевого сплава, содержащего 30% никеля, вы сможете оценить порядок этой самой точки

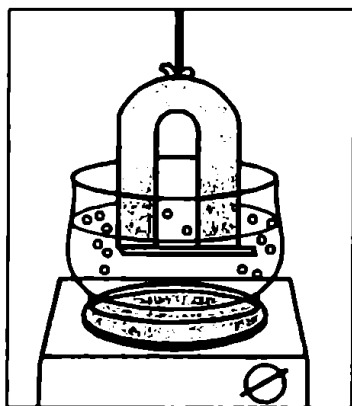


Рис. 2

Кюри для данного сплава. И вот как. С помощью все той же прочной веревки подвесьте подковообразный постоянный магнит к лапке металлического лабораторного штатива, предварительно замкнув полюса магнита железоникелевым стерженьком (рис. 2). Опустите эту систему в сосуд с кипящей водой, стоящий, например, на электроплитке. Очень скоро стерженек отпадет от полюсов магнита и упадет на дно сосуда.

# СТРАННЫЕ ТЕНИ И ОТРАЖЕНИЯ

*А. Митрофанов*

Как известно, очень часто тень от предмета или его отражение от зеркальной поверхности напоминает нам сам предмет. Например, на фотографии 1 вы без труда узнаете тень от забора, хотя эта тень какая-то изломанная, а не ровная, как сам забор. Случается даже, что сфотографированное зеркальное отражение, например в луже, какого-то



*Рис. 1*



*Рис. 2*

предмета практически не отличимо от снимка самого предмета, сфотографированного «без услуг» лужи.

Но у этого правила много исключений.

Хотите в этом убедиться? Тогда посмотрите внимательно на фотографии 2 и 3. Загадочная тень на стене 1-й Градской

---

Опубликовано в «Кванте» №3 за 1996 год.



Рис. 3

больницы в Москве явно не «стыкуется» с головой льва, а отражение коряги, «пойманное» фотографом ранним утром в Окской пойме, уж совсем не похоже на корягу!

Попробуйте это объяснить.

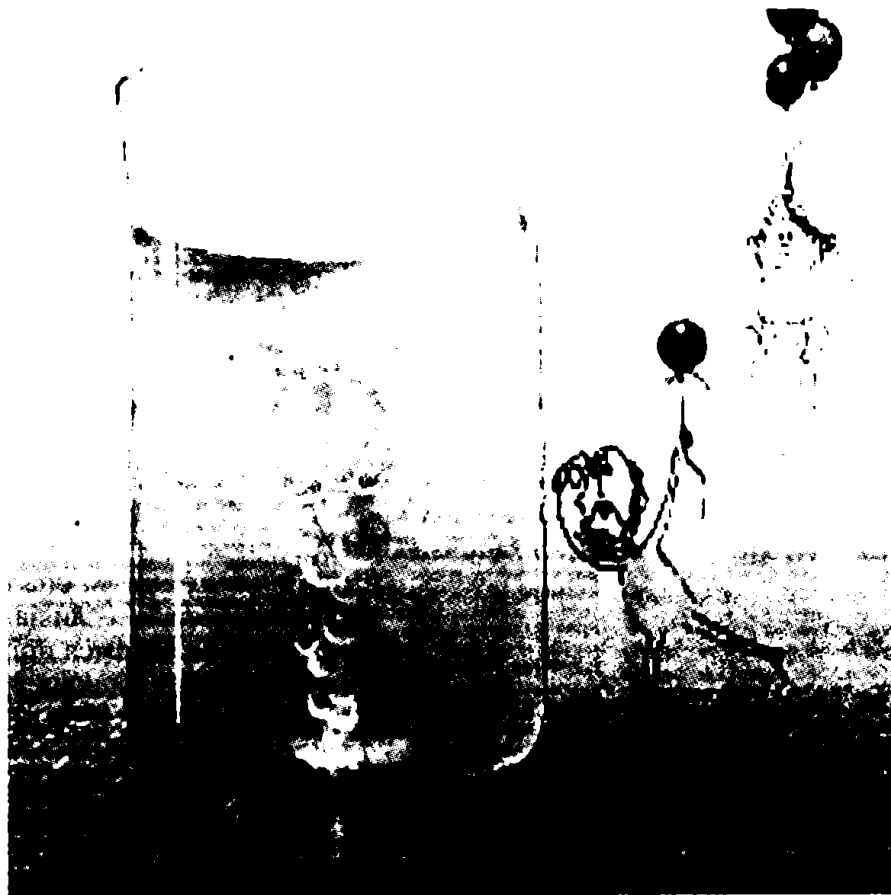
Если вам удастся разобраться в этом вопросе, вы поймете, на чем основан театр теней, а также с помощью телескопа сможете определить форму крупных гор и кратеров на Луне или некоторых планетах. А быть может, вы сумеете предложить интересный и простой метод исследования особенностей формы поверхностей (как гладких, так и не очень гладких) и измерить глубину велосипедной колес на песке (см. фото 1)?

Успехов вам!

# ПУЗЫРИ И ВИХРИ В КИПАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

*Т.Полякова, В.Заблоцкий, О.Цыганенко*

Кипение жидкости – явление, которое мы можем наблюдать практически каждый день. И, казалось бы, увидеть что-либо новое и удивительное в кипении обычной воды невозможно. На самом же деле это довольно сложный и многообразный процесс,



---

Опубликовано в «Кванте» №4 за 1996 год.

который и на сегодняшний день исследован далеко не в полной мере.

В этой статье речь пойдет о кипении вращающейся воды. Начнем с описания простого опыта, который каждый может осуществить у себя дома. Будем подогревать воду в цилиндрическом сосуде радиусом около 10 см и высотой 25 – 30 см. В тот момент, когда вода начнет закипать, приведем ее в состояние быстрого вращения, например размешав ее ложкой. Поверхность жидкости примет форму поверхности параболоида вращения, а ее угловая скорость вращения, как и следовало ожидать, будет со временем постепенно уменьшаться вследствие трения о стенки сосуда. Но если нагревание производить с помощью источника тепла, который локализован преимущественно в центре дна сосуда, то мы сможем наблюдать очень странную картину. Сначала вода начинает кипеть лишь вблизи центра дна, и большое количество пузырьков пара быстро поднимается вдоль оси вращения. Потом на поверхность воды вырывается столб пара, что сопровождается характерным шумом и разлетающимися брызгами воды. Сразу после этого уровень воды вблизи стенок сосуда понижается, а угловая скорость ее вращения увеличивается. Затем скорость вращения жидкости снова начинает уменьшаться, и через некоторое время (1 – 2 с) все повторяется вновь. Графически зависимость угловой скорости вращения кипящей жидкости от времени можно изобразить кривой *A* на рисунке 1. Здесь же кривой *B* показана зависимость угловой скорости вращения некипящей жидкости.

Если вы решили проделать этот опыт, но у вас ничего не получилось, не отчаивайтесь. Попробуйте еще раз, изменив интенсивность нагрева или высоту уровня воды в сосуде. Дело в том, что это явление очень капризно к условиям нагревания. (По

нашим наблюдениям, опыт получается лучше, если нагревание производится при помощи газовой горелки.)

При сравнении кривых *A* и *B* возникает по меньшей мере два вопроса. 1) Почему, в отличие от некипящей жидкости, зависимость угловой скорости вращения кипящей жидкости от времени имеет осциллирующий

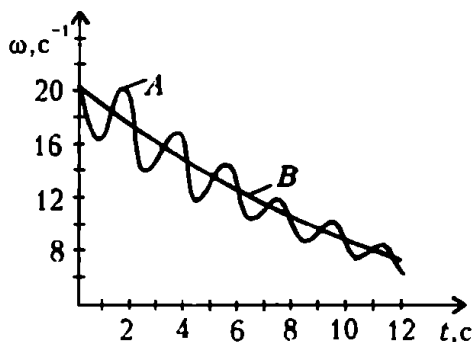


Рис. 1

характер? 2) Чем определяется период осцилляции угловой скорости?

Чтобы ответить на эти вопросы и разобраться в физике наблюдаемого явления, прежде остановимся на основных закономерностях кипения жидкости, подогреваемой снизу.

Как известно, кипением называется процесс интенсивного парообразования, характеризующийся непрерывным возникновением и ростом внутри жидкости пузырьков пара, которые всплывают к поверхности жидкости под действием силы Архимеда. Важнейшей величиной, определяющей характер кипения жидкости, является так называемый температурный напор  $\Delta T = T_1 - T_S$ , где  $T_1$  – температура горячей поверхности нагревателя,  $T_S$  – температура кипящей жидкости. В зависимости от  $\Delta T$  различают три различных характера кипения жидкости: пузырьковый, переходной и пленочный. Кроме того, если температура жидкости во всем объеме ( $T_0$ ) равна температуре кипения, то такое кипение называется насыщенными. Если же  $T_0 < T_S$ , а жидкость кипит только вблизи поверхности нагревателя, то это ненасыщенное (или недогретое) кипение.

В пузырьковом кипении принято выделять четыре основных этапа. Первый этап для воды, которая подогревается в металлическом сосуде, наблюдается при  $\Delta T = 10 - 16$  К и называется областью отдельных пузырьков. Для этого этапа характерно наличие отдельных активных центров образования пузырьков. Поверхностные и оторвавшиеся пузырьки пара не взаимодействуют между собой. Вокруг каждого центра существует «зона влияния», радиус которой равен отрывному диаметру пузырька  $d_0$ . («Зона влияния» всплывающих пузырьков представляет собой шар диаметром  $2d_0$ .) С увеличением  $\Delta T$  число активных центров на дне сосуда возрастает, а расстояние между соседними центрами уменьшается.

Когда среднее расстояние между активными центрами становится равным приблизительно  $2d_0$ , наступает второй этап кипения. На этом этапе в некоторых центрах вместо отдельных пузырьков возникают непрерывные цепочки пузырьков – столбики пара, образующиеся вследствие взаимодействия пузырьков.

При дальнейшем увеличении  $\Delta T$  начинается слияние пузырьков не только в одном столбике, но и в соседних активных центрах. В результате слияния нескольких столбиков возникает структура, называемая паровым грибом, и пузырьковое кипение вступает в третий этап – область паровых грибов. При этом с нагреваемой поверхности поднимаются большие

облака пара. Обычно паровые грибы соединены с нагреваемой поверхностью большим количеством паровых ножек. Когда паровой гриб вырастает до достаточно крупного размера, он отрывается у основания и всплывает.

Четвертый этап кипения начинается для воды при  $\Delta T = 22$  К (и длится до наступления так называемого кризиса кипения). На этом этапе ножки грибов сливаются друг с другом, и получается так, что паровое облако непосредственно соприкасается с нагреваемой поверхностью. (Таким образом, четвертый этап кипения уже содержит отдельные области пленочного кипения.)

Приступим к объяснению загадки возникновения осцилляции угловой скорости кипящей жидкости.

Пусть жидкость вращается (целиком, как твердое тело) с угловой скоростью  $\omega$ . Легко показать, что в этом случае ее свободная поверхность удовлетворяет уравнению

$$z - z_0 = \frac{\omega^2}{2g} r^2, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $z$  и  $r$  – обозначены на рисунке 2. Так как давление жидкости на дно сосуда равно  $p = \rho g z$ , из уравнения (1) найдем зависимость давления вблизи дна сосуда как функцию расстояния до оси вращения:

$$p = p_0 + \frac{\rho \omega^2 r^2}{2}, \quad (2)$$

где  $p_0$  – давление в центре дна,  $\rho$  – плотность жидкости. Если во вращающейся жидкости образовался пузырек пара радиусом  $R$ , то он сможет расти только в том случае, когда давление внутри пузыря ( $p_{II}$ ) будет превосходить сумму внешнего давления (2) и добавочного давления под изогнутой поверхностью жидкости

(лапласовского давления), равного  $2\sigma/R$ , где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Из выражения (2) следует, что при одной и той же температуре всех участков поверхности дна более благоприятные условия для роста имеют пузыри, образующиеся в центре. Кроме того, при удалении от оси вращения растет линейная скорость вращения жидкости, что также неблагоприятно сказывается на процес-

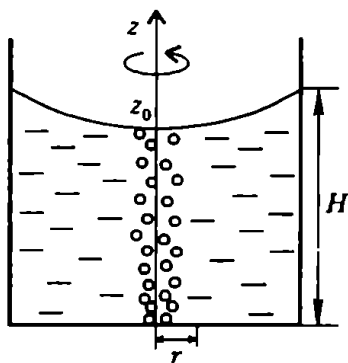


Рис. 2

се роста пузырьков. Если все же пузырек и образовался не в центре дна, то под действием силы Архимеда, равной в этом случае  $\rho\omega^2 r V$ , где  $V$  – объем пузырька, и направленной к оси вращения, он будет двигаться к центру.

Мы пришли к выводу, что во вращающейся жидкости все пузырьки должны концентрироваться вблизи оси вращения. Поэтому рассмотрим более детально условие роста пузырька, который находится на оси вращения жидкости. Для характеристики степени завихренности течения жидкости (или газа) вводится специальная физическая величина – циркуляция скорости  $\Gamma$ . Вокруг нашего пузырька циркуляция скорости отлична от нуля и равна

$$\Gamma = 2\pi\omega R^2.$$

Наличие такой циркуляции означает, что на пузырек (точнее на его «экватор») со стороны жидкости действует отрицательное давление, которое можно выразить через циркуляцию скорости:

$$p_{\Gamma} = -\frac{\rho\omega^2 R^2}{2} = -\frac{\rho\Gamma^2}{8\pi^2 R^2}.$$

Тогда условие роста пузыря будет выполненным, если  $p_n \geq p_1$ , где

$$p_1 = p_0 + \frac{2\sigma}{R} - \frac{\rho\Gamma^2}{8\pi^2 R^2}. \quad (3)$$

Если построить в соответствии с равенством (3) графики зависимостей  $p_1$  от  $R$  при различных значениях циркуляции, то получим кривые, приведенные на рисунке 3. Эти кривые показывают, что с возрастанием циркуляции скорости выполнение условия роста пузырька облегчается (условия смягчаются). (Интересно заметить, что давление жидкости, обусловленное ее вращением вокруг пузырька, играет роль, противоположную лапласовскому давлению. Например, для вращающейся воды роль лапласовского давления в процессе кипения будет сведена к нулю при значениях циркуляции  $\Gamma > 1,5 \text{ см}^2/\text{с}$ . А это означает,

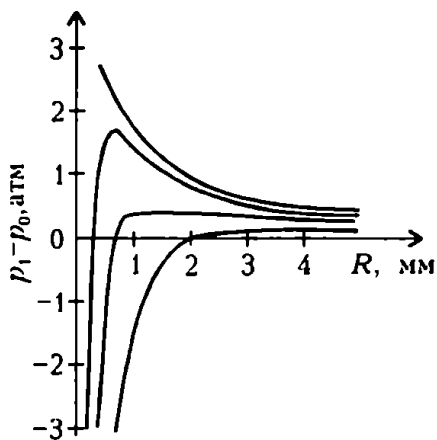


Рис. 3

в частности, что получить перегретую воду, в которой есть вихри с таким значением циркуляции, невозможно.)

Из предыдущих рассуждений и рисунка 3 можно заключить, что вихрь с любым значением циркуляции скорости представляет собой возможный центр образования пузырьков. Именно такие центры и возникают в нашем опыте с вращающейся водой. Поскольку температура воды в сосуде  $T_0 < T_S$  (т.е. мы имеем дело с недогретым кипением), центры кипения могут возникать только вблизи поверхности дна, где циркуляция скорости максимальна. Так как температура кипения определяется из условия  $p_n(T_S) = p_1$ , то в соответствии с равенством (3) (см. также рис.3) температура кипения воды в местах, где  $\Gamma \neq 0$ , оказывается ниже, чем там, где  $\Gamma = 0$ . Это означает, что в центре дна сосуда величина температурного напора  $T_1 - T_S$  может быть значительно больше, чем в других точках дна.

Если в центре дна температурный напор достигает значений  $\Delta T \approx 16 - 20$  К, то наступает второй или третий этап пузырькового кипения (в зависимости от величины  $\Gamma$ ). В нашем опыте, скорее всего, имеет место третий этап. Паровые грибы, образовавшиеся в центре дна, поднимаясь вверх вдоль оси вращения, сливаются друг с другом и образуют довольно крупные полости пара, поднимающиеся на поверхность. Когда такой столб пара вырывается в центре поверхности жидкости, то в образующееся «пустое» пространство устремляется «холодная» вода ( $T_0 < T_S$ ) с поверхности. Вода движется вниз, вращаясь почти точно так, как это происходит, когда вы выпускаете воду из ванны. В этот момент угловая скорость вращения воды в сосуде увеличивается, поскольку при перемещении некоторой массы воды от стенок цилиндра к оси вращения уменьшается момент инерции системы. Холодная вода, пришедшая с поверхности, быстро нагревается в центре сосуда до температуры, при которой вихрь вновь превращается в активный центр кипения. Снова на оси вращения образуются большие паровые полости, которые вытесняют воду ближе к стенкам сосуда, тем самым увеличивая момент инерции воды и уменьшая угловую скорость ее вращения перед выходом столба пара на поверхность.

Таким образом, ответ на первый из поставленных в начале статьи вопросов может быть дан в очень простой форме. Некипящая жидкость монотонно уменьшает свою скорость вращения вследствие трения о стенки сосуда, подобно фигуристу на льду, который не изменяет положения своих рук при вращении. Кипящая же жидкость изменяет свою угловую скорость враще-

ния подобно фигуристу, который во время вращения периодически разводит руки в стороны и прижимает их к туловищу.

Нам остается выяснить, кто же дирижирует движением рук нашего «фигуриста», или от чего зависит период осцилляции угловой скорости вращения кипящей жидкости. Ясно, что в соответствии с предложенным механизмом возникновения осцилляции их период равен сумме времени всплывания парового пузыря ( $t_1$ ) и времени «падения» воды от поверхности до дна ( $t_2$ ). Известно, что крупные пузыри ( $R > 0,1$  см) в воде всплывают со скоростью  $v \approx 30$  см/с. Поэтому время всплывания пузыря  $t_1 \approx z_0/v \approx 0,7$  с. Время  $t_2$  найти несколько сложнее, так как вода движется вниз по сложной кривой. Однако грубую оценку можно получить, используя формулу  $H = gt^2/2$  для свободного падения. При  $H \approx 25 - 30$  см это дает  $t_2 = 0,3$  с. Тогда для периода осцилляции угловой скорости получаем

$$T = t_1 + t_2 \approx 1 \text{ с},$$

что находится в хорошем согласии с опытными данными.

Интересно также понаблюдать, как происходит недогретое кипение воды при малых значениях циркуляции скорости в вихре. Для этого воду перед началом кипения надо вращать не очень быстро, а само явление наблюдать при освещении поверхности воды светом лампы. Если скорость нагрева невелика и источник тепла достаточно локализован, то вблизи оси вращения возникает отдельный активный центр образования пузырьков. В этом случае наблюдается второй этап пузырькового кипения — пузырьки, взаимодействуя по вертикали, образуют столбик пара. Когда пар выходит на поверхность, то, естественно, никакого изменения угловой скорости вращения всей жидкости не происходит, так как слишком мал источник парообразования и масса воды, вовлеченная в процесс кипения. Однако в центре поверхности воды можно наблюдать небольшую воронку, которая видна как темное пятно на дне сосуда. (Углубление на поверхности воды служит рассеивающей линзой для света, идущего от лампы.) Это означает, что после выхода столбика пара холодная вода устремляется вниз. И действительно, через время порядка 0,5 – 1 с после появления воронки центр кипения прекращает свою активную деятельность, но, спустя некоторое время, все повторяется вновь.

В этой статье мы рассмотрели лишь некоторые аспекты пузырькового кипения жидкости, но и они позволили сделать несколько важных выводов, касающихся этого удивительного явления.

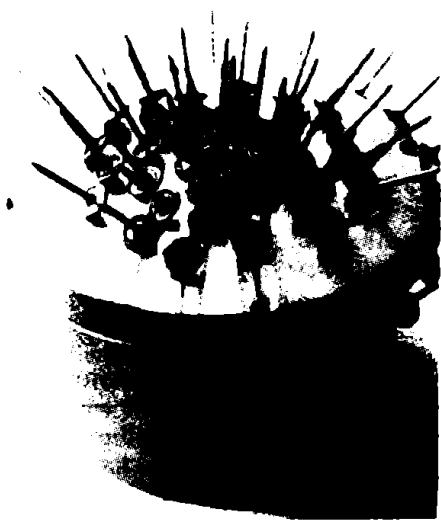
# МОЖНО ЛИ УВИДЕТЬ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ?

*А. Митрофанов*

Давайте вместе проведем несложный, но очень красивый и забавный опыт. Для опыта нам потребуется только небольшой магнит, например от старой игрушки или электроизмерительного прибора, и ... цветной телевизор. Достаточно включить настроенный на какой-либо канал телевизор и поднести к его экрану магнит, и произойдет чудесное превращение: на экране вблизи магнита цвета изменятся поразительным образом. Особенно красивые картинки получаются, если исходное изображение имеет крупные по площади участки одного цвета.

В присутствии магнита на экране во всей красе виден яркий и насыщенный разными цветами рисунок, чем-то напоминающий чередование цветов в радужных масляных разводах на мокром асфальте или картинку полярного сияния. Цветные полосы сгущаются вблизи контуров магнита и как бы делают видимым

(визуализируют) магнитное поле. Такая мысль невольно приходит в голову, если проводить несложные манипуляции с магнитом: вращать его, отодвигать или приближать к экрану, наблюдая при этом изменения цветов на экране. При этом «картинка» магнитного поля на экране получается более впечатляющей и выразительной, чем если бы мы захотели наблюдать поле магнита с помощью железных опилок, иголок, гвоздей (см. рисунок) или же с помощью несколько менее известного



---

Опубликовано в «Кванте» №6 за 1996 год.

индикатора магнитного поля, изготовленного на основе тонкой пленки жидкого масла со взвешенными в нем мелкими ферромагнитными частицами, находящейся на подложке и прикрытой сверху прозрачной полимерной пленкой. (Такой индикатор хорошо знаком, например, американским школьникам под названием «Magnetic viewing paper» – бумага для наблюдения магнитного поля.) К тому же экран телевизора чувствует довольно слабые магнитные поля, на которые железные опилки или масляный индикатор почти не реагируют.

Если вы захотите сфотографировать цветные изображения с экрана телевизора, возмущенные полем небольшого магнита, находящегося вблизи экрана, это сделать нетрудно. Для фотосъемки вам не нужен даже штатив. Яркость свечения обычного телевизионного экрана такова, что при фотографировании на фотопленке с чувствительностью 100 – 200 ед. при полностью открытой диафрагме требуется выдержка, приблизительно равная  $1/15$  или даже  $1/30$  секунды, т.е. такая, которая есть у многих фотоаппаратов. Более короткие выдержки ни к чему хорошему не приведут (подумайте, почему), а при более длительных выдержках снимать с руки без штатива трудно, даже если картинка на экране на глаз кажется неподвижной. Конечно, лучше использовать цветную негативную фотопленку, чтобы получить потом цветные фотографии. В наших экспериментах использовался отечественный цветной телевизор марки «Рубин-ТЦ 51» и фотоаппарат «Зенит» с зеркальным видоискателем.

Теперь приступим к объяснению опыта. Кое-кто из читателей, наверное, уже догадался, как это сделать. Действительно, все очень просто. Когда мы подносим магнит к экрану телевизора, в вакуумном объеме кинескопа вблизи экрана возникает магнитное поле. Возмущающее действие магнита – сила Лоренца – вызывает дополнительное отклонение луча, что приводит к изменению цвета в тех местах экрана, где смещение луча достаточно велико. Само отклонение электронного пучка магнитным полем – явление хорошо известное. Но каким образом в цветном телевизоре изменяется цвет экрана при его подмагничивании? Этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

Разберем задачу, не вдаваясь подробно в технические детали. Мы обычно не задумываемся над тем, сколь замечательны свойства нашего зрения, позволяющие различать цвета во всем их многообразии, наслаждаться яркими и сочными красками окружающего мира, улавливать тончайшие световые оттенки и полутона. Волшебный мир световых ощущений – обыденное

явление в жизни многих людей. И надо быть благодарным Природе, «предложившей» именно такой вариант зрения.

Но что мы понимаем под словами «цвет» и «цветовое зрение»? Световое излучение многих источников, например таких, как Солнце, лампа накаливания, освещенный лист белой бумаги или участок дневного неба, состоит из непрерывного ряда лучей с разными длинами волны. По определению, видимый свет – это та область электромагнитного излучения, на которую обычно реагируют глаза большинства людей (вопрос о цветовой слепоте людей мы здесь не рассматриваем). В длинах волн это диапазон примерно от 380 до 760 нм, т.е. от фиолетового до темно-красного. Более или менее однородную смесь лучей любого источника с помощью стеклянной призмы, дифракционной решетки или набора светофильтров можно разложить по длинам волн на узкие полосы, про которые мы говорим, что они имеют различные цвета, и которые наш глаз выделяет как красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый и их многочисленные оттенки. Результат разложения светового пучка на составляющие с разными длинами волн или разными частотами называют спектром (от латинского слова *spectrum* – представление, образ). Цветовое зрение возможно потому, что в сетчатке нашего глаза есть детекторы трех типов – это колбочки, способные по-разному поглощать свет с разной длиной волны. Пигменты колбочек имеют широкие полосы поглощения, но максимумы поглощения находятся в разных участках и соответствуют длинам волн 430, 530 и 560 нм. Три типа колбочек – не единственные светочувствительные рецепторы глаза. Когда света мало, темно или полумрак, колбочки не реагируют активно на видимое излучение, и в действие включается другой механизм зрения – с помощью палочек. Палочки содержат высокочувствительный к свету пигмент родопсин, ответственный за сумеречное зрение – когда мы еще видим, но уже не различаем цвета.

С помощью оптических приборов можно не только получить спектр источника излучения, но и выполнить обратную операцию – собрать воедино лучи разного цвета. Вообще, смешение разных цветов приводит к поразительным результатам, далеко не очевидным и предсказуемым, как могло бы показаться на первый взгляд.

Обратимся к известной демонстрации, которая восходит еще к опытам Ньютона и Максвелла по смешению цветов. С помощью трех проекторов осветим экран тремя частично перекрывающимися пучками света, на пути которых находятся три разных

светофильтра: красный, зеленый и синий. Подобрав подходящую интенсивность каждого из любых двух пучков по отношению к третьему, получим, что в области перекрытия всех трех пучков экран выглядит... белым. Красный и зеленый пучки, перекрываясь, дают в результате желтый цвет, а синий и зеленый – голубой. Можно сказать также, что освещение белого экрана голубым и красным пучками дает белый цвет.

Предположим теперь, что красное, зеленое и синее световые пятна находятся на экране рядом друг с другом, не перекрываясь, но имеют настолько малые угловые размеры, что не разрешаются глазом каждое по отдельности. Тогда на экране такой объект будет выглядеть как белая точка. Это происходит потому, что каждая световая точка в нашем глазу (при фокусировке хрусталиком на сетчатку) получается слегка расплывшейся и пятна различного цвета действуют на цветовые пигменты соседних колбочек. Мозг, обрабатывая информацию от чувствительных центров разных колбочек, сигнализирует нам, что мы видим белую точку. Изменив соотношение интенсивностей цветов в пучках, а также возможно изменив окружающий фон, мы можем наблюдать цветную точку любого цвета и оттенка. Подобным образом с помощью сочетания разных не смешанных красок, нанесенных отдельными точками на холст, художники-пуантилисты добивались создания любого цветового образа у зрителя, рассматривавшего картину с некоторого расстояния.

Отмеченные особенности цветового восприятия лежат и в основе действия кинескопа цветного телевизора. Экран кинескопа состоит из множества мелких одинаковых по форме люминофорных элементов в виде кругов или полосок, собранных в группы по три. Ячейки элементов имеют разный химический состав (соединения элементов и добавки Zn, S, Se, P и т.д.) и под действием трех электронных лучей светятся красным, зеленым и синим цветом. Эти три цвета, заданные в определенной пропорции по интенсивности, позволяют воспроизвести широкую гамму цветов и оттенков в изображении с высоким пространственным разрешением, так как люминофорные ячейки достаточно малы. Впрочем, люминофорные полоски можно увидеть непосредственно глазом, если приблизиться к освещенному экрану, или через увеличительное стекло. А еще лучше сфотографировать их в увеличенном виде.

Вернемся к кинескопу. Вблизи его экрана на расстоянии около сантиметра от него устанавливаются так называемые теневые маски – металлические тонкостенные экраны с множеством регулярно расположенных отверстий, а также электрон-

ные прожекторы – по три на каждый экран кинескопа. Во время телевизионной передачи в цветном изображении телевизионная развертка лучей выполняется общей для кинескопа магнитной отклоняющей системой, но каждый из трех лучей модулируется своим видеосигналом, соответствующим изображению в красном, зеленом или синем цвете. Взаимное расположение прожекторов, люминофорных ячеек и отверстий в теневой маске подобрано так, что ячейки люминофора какого-либо цвета остаются открытыми только для облучения электронами от своего прожектора, т.е. прожектора, луч которого модулируется видеосигналом, отвечающим за цвет в изображении, совпадающий с цветом свечения выбранного нами люминофора. Другие два прожектора засвечивают свои, соответствующие им люминофорные ячейки. В этом и состоит суть устройства и принцип действия цветного кинескопа, вернее, одной из его разновидностей – с цветоделительным элементом в виде теневой маски.

Даже такого краткого описания принципа работы кинескопа цветного телевизора вполне достаточно, чтобы разобраться, почему магнитное поле маленького внешнего магнита разрушает цветное изображение на экране телевизора, почти не изменяя геометрические очертания предметов. Действительно, если горизонтальная составляющая силы Лоренца, действующая на электроны пучков в кинескопе из-за возмущающего действия внешнего магнита, помещенного у экрана, вызывает отклонение лучей на расстояния, соизмеримые с горизонтальным периодом отверстий в маске или расстоянием между люминофорными полосками, то цветовой баланс в изображении будет нарушен и окраска предметов изменится. При развертке лучей в области магнитного поля электроны «сбиваются» со своего пути, проникают через «чужие» отверстия в теневой маске и засвечивают люминофорные ячейки другого цвета. Когда убирают магнит, цвета на экране восстанавливаются.

Внимательный читатель, особенно если он находил на свалке теневую маску от кинескопа цветного телевизора, мог бы добавить к нашему объяснению, что не только электроны сбиваются со своего пути из-за внешнего магнитного поля, но и теневая маска, сделанная из мягкой стали, притягивается к магниту, деформируется и пропускает «чужие» электроны.

Итак, в целях безопасности рекомендуем вам проводить опыты только с маленькими, пробными магнитами объемом  $1-2\text{ см}^3$ . В экспериментах с массивным магнитом никто не застрахован от возможности разбить экран, необратимым обра-

зом деформировать теневую маску, нарушить работу прожектора электронов и других устройств телевизора.

В заключение вспомним одну забавную историю, которую как-то раз поведал своим студентам академик П.Л.Капица.

Однажды с Дальнего Востока в командировку в Москву в Академию наук прилетел капитан второго ранга N, командир боевого корабля. Капитан прибыл с необычным грузом: он привез свое изобретение – магнит, который, по его словам, имел только один полюс, северный. И еще привез капитан письмо от адмирала, своего прямого начальника, с просьбой к ученым Академии разобраться с изобретением капитана, которое больше напоминало открытие, и дать авторитетное заключение.

Магнит выглядел просто: брусок металла массой около килограмма, покрытый свинцовым суриком, и оба полюса магнита – северные. П.Л.Капица, к которому направили капитана, сразу «раскусил» загадку: магнит был составлен из двух одинаковых намагниченных стальных половинок, аккуратно приклеенных друг к другу южными полюсами и покрашенных в один цвет. Капица спросил капитана, зачем тот проделал такую шутку. Оказалось, что капитан никогда раньше не был в Москве, хотя об этом мечтал давно, а начальство, т.е. адмирал, не отпускало со службы, даже в увольнение. Другой подходящий способ попасть в столицу капитану не пришел на ум.

А будь у адмирала цветной телевизор, вряд ли он отправил бы капитана в командировку в Москву. Догадайтесь, каким образом телевизор мог бы помочь адмиралу разгадать загадку капитанского магнита. И заодно попробуйте ответить еще на несколько вопросов.

1. Каким образом возникает черный цвет в изображении на экране цветного телевизора? Почему он часто кажется более черным (или более темным), чем просто экран выключенного телевизора?

2. Ночью в полнолуние на улице довольно светло, и видны многие предметы. Однако по цвету они сильно отличаются от того, как выглядят днем. Подобная картина наблюдается и в опыте с цветным телевизором: если сбалансированное цветное изображение ослабить плотным нейтральным (по спектру) светофильтром, то исчезнут красные и зеленые тона и изображение станет серо-синим. Объясните это.

3. Как отличить, смещаются ли электронные лучи при приближении магнита к экрану цветного телевизора или же деформируется (изгибается) теневая маска, притягиваясь к магниту?

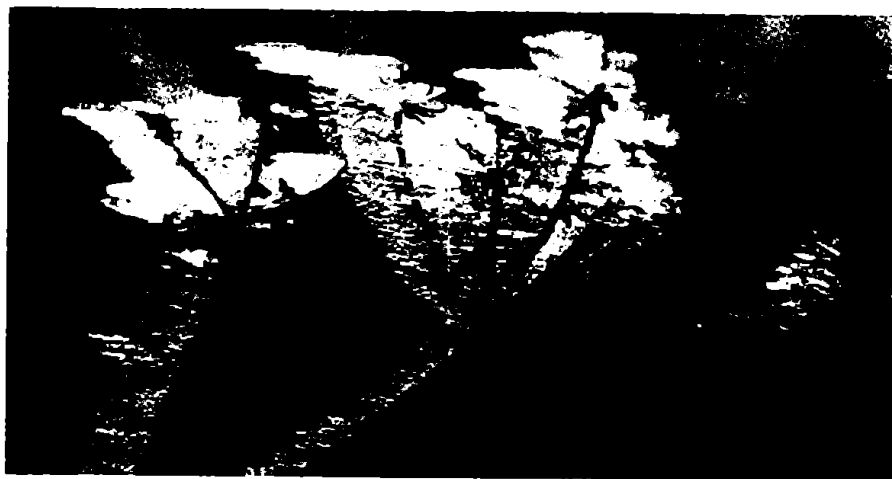
4. В правую или левую часть экрана кинескопа отклоняются электроны под влиянием магнитного поля Земли? Телевизор находится а) в Московской области, б) в Одессе, в) на экваторе, г) на юге Австралии.

# КУДА ДУЕТ ВЕТЕР?

*А. Митрофанов*

Осенью или зимой в тихую и туманную погоду ветки на деревьях и кустах, провода, мачты антенн покрываются мохнатым ииеем или инееобразным ледяным слоем – изморозью. Иней и изморозь состоят из мельчайших частичек льда, слипшихся в виде столбиков, тонких перьев, игл и т.п. Обычно ииеем называют снежные кристаллы, которые образуются из водяных паров в насыщенной влагой атмосфере, а изморозью – ледяной осадок, возникший из переохлажденных капелек тумана. Иней и изморозь могут появляться, а могут и исчезать – если вдруг потеплеет или подует сухой ветер (при этом кристаллики льда тают или испаряются соответственно).

Оказывается, даже небольшой ветерок способен сильно изменить картину морозных узоров. Посмотрите на фотографию ветки растения, покрытого изморозью. Ветка была сфотографирована морозным утром, когда был очень сильный туман, гололед и дул слабый ветер. Можно ли по этой фотографии



---

Опубликовано в «Кванте» №2 за 1997 год.

однозначно установить направление ветра?

Давайте попробуем.

Так как изморозь образуется из капелек тумана, она появляется на предметах преимущественно с подветренной стороны и может быстро расти при ветре. В нашем случае во время съемки погодные условия были благоприятны росту изморози (а не таянию льда), а слабый ветер способствовал появлению анизотропии формы ледяных наростов. Поэтому, глядя на фотографию, легко определить преимущественное направление ветра – слева направо.

А теперь подумайте, как по виду ледяных кристалликов изморози или инея (не привлекая каких-либо метеоданных) узнать, давно или недавно образовался ледяной нарост на ветках.



*А. Митрофанов*

Линзу-игрушку, о которой пойдет речь в статье, подарил мне когда-то Н. И. Милюков – фотограф и личный лаборант академика П. Л. Капицы. А ему линза досталась как сувенир от академика А. П. Александрова, тогдашнего Президента Академии наук. Дело было так.

Капица пригласил Александрова в свою Физическую лабораторию, чтобы познакомить его с новыми и интересными результатами экспериментов с газовыми разрядами высокого давления в сильном сверхвысокочастотном поле. Визит, как говорится, удался. После осмотра и теплой беседы с персоналом плазменной установки этот сувенир и был подарен гостем Н. И. Милюкову.

Мне не известно, кто первым придумал опыт с «волшебной»



*Рис. 1*

линзой, но с той поры я точно знаю, что забавные игрушки и опыты-фокусы любят не только дети, но и студенты, лаборанты, доктора наук и почетные академики...

Рассмотрим опыт с линзой, изготовленной из оргстекла на токарном станке. Этот опыт очень простой и напоминает фокус.

Линза представляет собой сильно выпуклое тело, похожее на половинку сливы, с толстым цилиндрическим ободком, который крепится к пластинке-подставке, также выполненной из оргстекла (рис. 1). Для креп-

---

Опубликовано в «Кванте» №1 за 1999 год.

ления в пластинке сделано цилиндрическое углубление, куда плотно вставляется основание линзы.

Внешне линза с пластинкой ничем не примечательна. Выпуклое тело с гладкой поверхностью, да и только. Но давайте поместим линзу в чашку, стакан или любую другую емкость, в которую нальем воду (рис.2).

Как только уровень воды достигнет вершины линзы, в чашке под линзой неожиданно появляется четкое изображение некоего предмета. А до тех пор, пока линза не окажется в прозрачной жидкости (в нашем опыте – в воде), изображения нет, как бы мы не старались его увидеть.

Вы, наверное, уже догадались, в чем секрет этого опыта. В углублении подставки под самой линзой спрятана маленькая фотография (или рисунок), изображение которой и появляется в чашке с водой под линзой. Но какова роль воды в этом опыте, и почему без воды в чашке фотография не видна? Ведь если мы возьмем обычную собирающую линзу, например очковое стекло или конденсорную линзу фотоувеличителя, и положим ее на плоский предмет или фотографию, то через линзу этот предмет хорошо виден. Точнее, мы видим увеличенное мнимое изображение предмета (рис.3,а). Даже если линза имеет большую угловую апертуру, например если это стеклянное полушарие или даже шар, предмет все равно виден через линзу (подумайте, почему), хотя и с измененными формами.

Будем теперь плавно увеличивать расстояние от предмета до линзы. Изображение тоже станет увеличиваться, но начнет разрушаться и пропадать, когда предмет окажется вблизи фокальной плоскости линзы и увеличение, даваемое линзой, будет стремиться к бесконечности. Далее, когда расстояние от линзы до предмета окажется больше фокусного расстояния линзы  $F$ , линза



Рис. 2

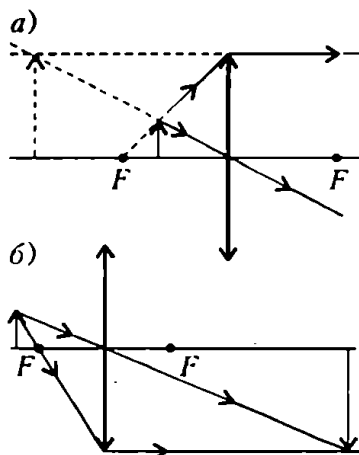


Рис. 3

даст действительное, но уже перевернутое изображение предмета (рис.3,6).

Таким образом, чтобы предмет не был виден под собирающей линзой, он должен обязательно находиться вблизи ее фокальной плоскости. Именно так устроена наша «волшебная» линза из оргстекла, при этом толщины линзы, ободка и углубления в пластинке подобраны соответствующим образом, а фотография

находится от линзы практически на фокусном расстоянии.

Оценим теперь, чему равно это фокусное расстояние. Пусть линза в области вершины аппроксимируется сферой с известным радиусом кривизны  $R$ . На рисунке 4 показано центральное сечение линзы,  $CC'$  – ее ось,  $O$  – центр кривизны линзы в области вершины. Пусть  $n$  – показатель преломления материала линзы, для оргстекла  $n = 1,47$

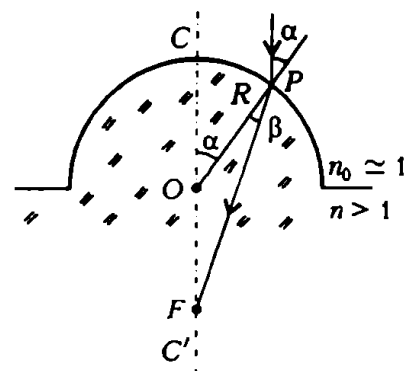


Рис. 4

для длин волн света порядка  $0,5 - 0,6$  мкм), а  $n_0 \approx 1$  – показатель преломления воздуха. Пусть вдоль оси на линзу падает параллельный пучок света. Рассмотрим ход одного из лучей, падающих на линзу в произвольную точку  $P$ , которая находится вблизи оси  $CC'$  (параксиальное приближение). Здесь  $\alpha$  – угол падения этого луча,  $\beta$  – угол преломления,  $F$  – точка пересечения луча с осью линзы, т.е. фокус линзы для лучей, близких к оптической оси. Полагая углы  $\alpha$  и  $\beta$  малыми, т.е. считая  $\sin \alpha = \alpha$  и  $\sin \beta = \beta$ , имеем  $\alpha = n\beta$  (закон преломления света) и  $OF/R = \beta/(\alpha - \beta)$  (теорема синусов для треугольника  $OPF$ ), откуда получаем  $OF = R/(n - 1)$ . Фокусное расстояние линзы, измеренное от ее вершины, равно

$$CF = R + \frac{R}{n - 1} = R \frac{n}{n - 1} \approx 3,1R.$$

У нашей линзы  $F = 2,6$  см, что соответствует радиусу кривизны линзы  $R = 0,83$  см. Именно на расстоянии чуть больше дюйма от вершины линзы под ней была спрятана фотография, которая «проявилась», когда мы поместили линзу в воду.

Каким образом оказалось возможным увидеть фотографию под линзой в воде? Дело в том, что в воде преломляющая способность линзы уменьшилась и из короткофокусной линза

превратилась в длиннофокусную. Действительно, коэффициент преломления воды в видимой области спектра составляет  $n_{\text{в}} = 1,33 - 1,34$ , а относительный коэффициент преломления оргстекла в воде равен  $n_{\text{отн}} = n/n_{\text{в}} = 1,10 \pm 0,01$ . Поэтому нижнее фокусное расстояние нашей линзы, залитой сверху водой, оказалось равным

$$F_{\text{в}} = R \frac{n_{\text{отн}}}{n_{\text{отн}} - 1} = \frac{1,1}{0,1} R = 11R,$$

если считать, что полупространство под линзой состоит из оргстекла и фокусное расстояние измеряется от вершины линзы. Таким образом, вода увеличивает фокусное расстояние линзы более чем в 3,5 раза, что оказывается вполне достаточным для наблюдения спрятанного под линзой объекта.

Идея рассмотренного опыта очень проста и может быть использована в других случаях. Так, линзу можно сделать матовой, ступенчатой (со ступеньками от резца) или даже гофрированной. Или еще проще – в качестве маскировочного покрытия некоторого плоского объекта можно взять матированную сверху пластинку из прозрачного материала, которая в воде или другой специальной жидкости станет на вид почти гладкой, что позволит наблюдать спрятанный под пластинкой объект. Такая оптическая маскировка и декодировка объекта с помощью изменения показателя преломления среды представляет определенный практический интерес.

В заключение предлагаем вам подумать над тем, какими еще оптическими способами можно сделать видимым объект, «спрятанный» в фокальной плоскости линзы.

# КАПЕЛЬКИ РОСЫ, СТЕКЛЯННЫЕ ШАРИКИ И МИКРОСКОП ЛЕВЕНГУКА

*А. Митрофанов*

Обычная капелька росы, размером чуть больше миллиметра, – это короткофокусная прозрачная линза с очень гладкой поверхностью и почти сферической формой. Помещенная между рассматриваемым предметом и глазом, такая линза дает увеличение  $\Gamma \approx d_0/F$ , где  $d_0 = 250$  мм – расстояние наилучшего зрения,  $F$  – фокусное расстояние линзы. Чем меньше линза-росинка, тем меньше ее фокусное расстояние и тем большее достигается увеличение. Наверное, вы и сами не раз наблюдали сильно увеличенное изображение ворсинок или прожилок листьев через каплю росы ясным летним утром.

По сути дела, росинка – это аналог первой линзы объектива современного оптического микроскопа. Но экспериментиро-



---

Опубликовано в «Кванте» №5 за 1999 год.

вать с росинками не очень удобно – они легко стекают с листа растения или испаряются. Надежнее проводить наблюдения с искусственными, стеклянными «росинками». Удивительных результатов в этом направлении достиг голландский торговец мануфактурой Антони ван Левенгук (1632 – 1723), всю жизнь посвятивший изготовлению и совершенствованию однолинзовых микроскопов и наблюдениям с помощью этих чудесных приборов. Основой заготовки каждого объектива Левенгуку служил, видимо, маленький стеклянный шарик, который он выплавлял над пламенем горелки из стеклянной нити.

Короткофокусную линзу высокого качества самостоятельно изготовить довольно трудно, но можно воспользоваться готовым стеклянным шариком. Например, такие шарики (две штуки) диаметром порядка 10 мм используются при сборке сложной пробки для бутылки (для улучшения характеристик вытекающей из бутылки струи). Фокусное расстояние такого шарика около 3 мм, что позволяет использовать его в качестве объектива с увеличением  $\Gamma \sim 10^2$ . Можно сошлифовать донышко шарика на наждачном бруске, а затем отполировать стеклянную плоскость с помощью полировочной пасты (паста ГОИ). Это увеличит так называемое рабочее расстояние микроскопа, т.е. допустимое расстояние между объектом и линзой-объективом, и обеспечит лучшее качество изображения.

Попробуйте самостоятельно разобраться, как лучше и удобнее проводить наблюдения с помощью изготовленного вами микрообъектива.

Левенгук владел многими тайнами техники микроскопии. Например, в литературе высказывается предположение,



что он первым применил темнопольное освещение, существенно улучшающее контраст микроскопического изображения и облегчающее наблюдения прозрачных объектов и препаратов. Но среди секретов Левенгука был главный, который состоял в том, что человек может сделать многое, если посвятит своей работе всю жизнь. Не случайно Левенгук стал членом Лондонского Королевского общества и одним из самых знаменитых людей своей эпохи.

Для своих микроскопических наблюдений Левенгук обычно пользовался придуманным и сконструированным им самим простым микроскопом, т.е. лупой, снабженной механическим устройством для фиксирования и фокусировки объекта. Единственная более или менее короткофокусная линза этого микроскопа была наглухо закреплена между двумя металлическими пластинками, каждая с точечным круглым отверстием, служившим для прохождения света. При помощи подвижной скобы к пластинкам прикреплялся вертикальный винт (ручка) с небольшим столиком на верхнем конце. Столик нес вращающуюся иглу для фиксирования объекта; горизонтальный винт, проходивший сквозь столик и упирившийся в пластинку, позволял менять расстояние столика от пластинки и вместе с тем — расстояние объекта от линзы, т.е. фокусировать объект.

Приведем отрывок из книги ученого-бактериолога Поля де Крюи «Охотники за микробами», описывающий, как работал Левенгук:

«Замечательно забавно смотреть через линзу и видеть предметы увеличенными во много раз. Что ж, покупать для этого линзы? Ну, нет! Не таков был Левенгук. В течение двадцати лет неизвестности он ходил к оптикам и обучался у них искусству обтачивать и шлифовать стекла. Он посещал алхимиков и аптекарей, совал свой нос в их тайные способы выплавлять металлы из руд и понемногу научился обращаться с золотом и серебром. Это был чрезмерно упорный и настойчивый человек; он не довольствовался тем, что его линзы были так же хороши, как у лучших мастеров Голландии, — нет, они должны быть лучше самых лучших! И добившись этого, он все еще сидел и возился с ними много часов подряд. Затем он вставлял эти линзы в небольшие оправы из меди, серебра или золота, которые он сам вытягивал на огне, среди адского дыма и чада. В наше время исследователь покупает за сравнительно небольшие деньги изящный блестящий микроскоп, поворачивает винт, заглядывает в окуляр и делает свои открытия, мало задумываясь о том, как устроен микроскоп. Но Левенгук сам делал свои инструменты.

Конечно, его соседи думали, что он немного «тронулся», но он упорно продолжал жечь и калечить свои пальцы. Он весь ушел в работу, забывая о семье и друзьях, просиживая целые ночи напролет в своей тихой странной лаборатории. И в то время как добрые соседи над ним исподтишка посмеивались, этот человек научился делать мельчайшие линзы, размером меньше  $1/8$  дюйма в диаметре, и притом настолько симметричные, настолько точные, что они ему показывали самые мелкие предметы в сказочно огромном и ясном виде.

Да, он был совершенно некультурный человек, но только он один во всей Голландии умел делать такие линзы и при этом говорил о своих соседях:

— Не стоит на них сердиться: они ведь ничего лучшего не знают...

Затем этот самодовольный торговец мануфактурой стал наводить свои линзы на все, что попадалось ему под руку. Он смотрел через них на мышечные волокна кита и на чешуйки своей собственной кожи. Он отправлялся к мяснику, выпрашивал или покупал у него бычьи глаза и восторгался тонким устройством хрусталика внутри глаза. Он часами изучал строение овечьих, бобровых и лосиных волосков, которые под его стеклышком превращались в толстые мохнатые бревна. Он исследовал поперечные срезы разных пород деревьев и, прищурившись, любовался семенами растений...

Этот чудной парень Левенгук был похож на молодого щенка, который, пренебрегая всеми правилами приличия и учтивости, с любопытством обнюхивает каждый новый предмет в окружающем его мире».

Де Крюи назвал Левенгука первым охотником за микробами.

*А. Митрофанов*

В книгах по технической оптике можно встретить термин «муар» (или «муаровый узор» — «moiré pattern»). Этот термин используется и в быту — когда речь идет о шелковой ткани с разводами, переливающимися на свету разными оттенками (муаровый шелк). Явление муара достаточно интересно, чтобы обратить на него наше внимание.

Что такое муар, легче всего понять, если взять две одинаковые регулярные сеточки — например кусочки ткани, которой закрывают летом открытые окна и форточки от комаров и мух, — и наложить их друг на друга. В месте пересечения сеточек будут отчетливо видны регулярные узоры, которые называют муаром (рис. 1). Существенно, что картина узоров очень «живая»: при малейшем перемещении сеточек относительно друг друга муар мгновенно изменяется.

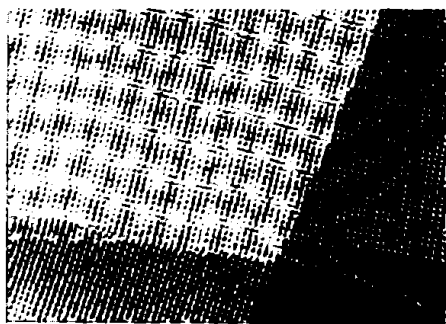


Рис. 1



Рис. 2

Если сеточки одномерные (т.е. если это решетки), муаровые узоры от них имеют вид полос, похожих на раскраску зебры (рис. 2). Такие узоры можно наблюдать, например, проезжая мимо заслоняющих друг друга заборов из регулярных прутьев, кольев или досок.

---

Опубликовано в «Кванте» №6 за 1999 год.

На рисунке 3 приводятся фотографии участка одной из сеточек от электробритвы и двух из многочисленных вариантов муаровых узоров, получающихся на просвет, когда две сеточки накладываются друг на друга. (В этом опыте при фотографировании использовался фотоувеличитель, а сеточки помещались в рамку вместо негатива.)

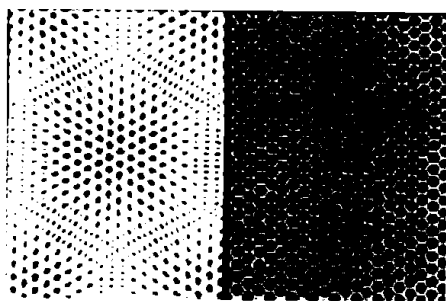


Рис. 3

На рисунке 4 показаны муаровые узоры, полученные с помощью скрещенных листов цветной бумаги с прорезями.

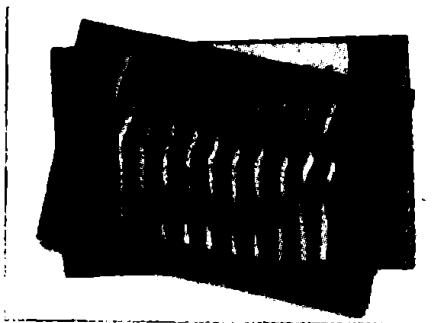


Рис. 4

Экспериментируя с любыми из перечисленных объектов – например, с сетками от электробритвы, кусочками прозрачной ткани, вырезанными из бумаги регулярными решетками и т.п., – можно установить некоторые закономерности, присущие муаровым узорам. Вот некоторые из них.

1) В опытах наблюдается эффект, называемый муаровым увеличением. Если в двух одинаковых регулярных сеточках период структуры очень малый, меняя взаиморасположение сеточек, удастся получить как бы увеличенное изображение отдельных ячеек сеточки и без труда определить вид ее структуры и тип симметрии. (Объясните, каким образом достигается увеличение в муаре.)

2) Муаровые узоры, как уже отмечалось, очень чувствительны к относительному перемещению сеточек. Это позволяет изготавливать прецизионные измерители линейных перемещений и поворотов. (Попробуйте оценить возможную чувствительность таких муаровых датчиков.)

3) Муаровые узоры пропадают, если сеточки имеют слишком разные периоды или если они расположены далеко друг от друга. (Подумайте, почему.) По муаровым узорам можно определять величину неизвестного периода структуры одной из сеточек, когда известен другой, и измерять величину зазора между сеточками. Теневые или зеркально отраженные картины от одной

сеточки с достаточно малым шагом позволяют изучать качество или форму поверхности тела, на которой создается тень или которая служит зеркалом. Сравнительно просто проверить по муаровым узорам качество изготовления решеток, сеточек и других регулярных структур на просвет.

4) Для электронно-оптических приборов, визуализирующих изображение, существует термин «муаровый предел разрешения», описывающий ограничения характеристик технических систем с дискретным набором регулярно расположенных фотодатчиков или световых волокон, по которым распространяется свет.

Несмотря на то что эффект образования муара обсуждается в научной литературе еще со времен лорда Рэля, у муаровых узоров появляются все новые и новые приложения, включая тонкие вопросы метрологии и художественного оформления предметов, архитектурных сооружений, одежды и т.д.

*Н. Елисеев*

Наверное, самым любимым нашим лакомством на всю жизнь остается мороженое. Что же представляет собой мороженое с точки зрения физики? Попробуем ответить на этот вопрос.

Сам факт изобретения мороженого очень интересен. Ведь по сути мороженое – это застывшее молоко. Однако если вы поставите в морозильник молоко и заморозите его, у вас получится кусок льда, абсолютно не похожий на мороженое. Замороженное молоко достаточно твердое, его сложно откусить – можно повредить зубы.

Оказывается, все дело в технологии приготовления мороженого. На заводе по производству мороженого молоко, специальным образом подготовленное и охлажденное до температуры застывания, подают на устройство, которое распыляет его внутри морозильной камеры. При этом образуется множество мелких кристалликов молока, которые тут же смерзаются между собой (температура-то в морозильнике низкая). Эта полученная масса и представляет собой любимое нами мороженое.



---

Опубликовано в «Кванте» №3 за 2000 год.

Теперь попробуем разобраться, чем же отличается мороженое от просто замерзшего молока. Мороженое – это множество мелких кристалликов, по структуре очень похожих либо на мелкий сахарный песок, либо на мелкую-мелкую пену и поэтому представляющих как бы сплошную массу. Такие системы, состоящие из множества частиц какого-либо вещества, распределенных в однородной среде, физики называют дисперсными (от латинского *dispersio* – рассеяние). Свойства дисперсного вещества отличаются от свойств тех веществ, из которых такая масса образована. Это вы сможете и сами заметить, если попробуете мороженое и обычное замерзшее молоко – они будут сильно различаться по вкусу.

А можно ли приготовить мороженое дома? При определенном старании и терпении, конечно, можно.

Предлагаем простой рецепт изготовления мороженого в домашних условиях. Сначала приготовим молоко: для этого его нагреем и растворим в нем одну-две ложки сахарного песка. Подождем, пока молоко остынет, и поставим в холодильник – желательно охладить до температуры, как можно более близкой к температуре застывания молока. Далее взобьем охлажденную массу, лучше миксером, и быстро поставим в морозильник для ускоренной заморозки. Замерзшая масса по вкусу будет напоминать молочное мороженое. (Для проведения настоящего физического эксперимента одновременно просто заморозьте подслащенное молоко и сравните вкус этих двух продуктов.) А если перед взбиванием молочной смеси в нее добавить желток куриного яйца, то получится мороженое-пломбир.

*Внимание!* Ни в коем случае не замораживайте молоко в стеклянной посуде – она может лопнуть. Надежнее использовать пластиковые или бумажные стаканы.

Кто захочет подробнее познакомиться с различными рецептами приготовления мороженого, загляните в кулинарные книги, лучше – в старинные.

# ПОЧЕМУ ВРАЩАЕТСЯ ВЕРТУШКА?

*А. Карачи, Д. Кузовкин, В. Сухомесов, С. Тодышев*

Если изогнуть проволочку, как показано на рисунке 1, повесить на иглу и подключить к борну (полюсу) электрофорной машины, а машину привести во вращение, то и вертушка начинает вращаться. Причем вращение происходит при подключении вертушки как к «минусу», так и к «плюсу» машины.

Краткое упоминание об этом опыте и описание его механизма мы нашли лишь в книге Дж. Уокера «Физический фейерверк» (М.: Мир, 1979): «Эта вертушка была предметом споров на протяжении двух столетий... В учебной физической лаборатории иногда демонстрируют вертушку, которая приводится в движение подключением ее к высоковольтному источнику постоянного напряжения... Вертушка крутится потому, что воздух вблизи ее острия ионизируется. В сильном электрическом поле образовавшиеся ионы и острие оказываются заряженными одинаково и отталкиваются».

Мы решили исследовать этот процесс и попробовать его объяснить. Вертушку сделали из медной проволоки диаметром 1 мм с лаковой изоляцией. Для усиления эффекта электрофорную машину заменили высоковольтным преобразователем «Разряд-1», так что на вертушку теперь подавалось напряжение порядка 5000 В.

Вот что у нас получилось.

Прежде всего, опыты показали, что скорость вращения вертушки зависит от взаимного расположения вертушки и провода, которым она подсоединялась к преобразователю. При

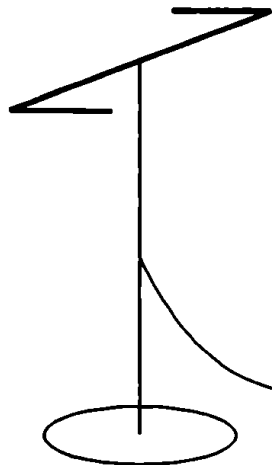


Рис. 1

некотором их взаимном расположении вертушка совсем не вращалась.

Поставив вертушку на середину дна ведра, подводящий провод расположили вплотную к его дну и стенке и с помощью гальванометра измеряли ток, текущий через вертушку. Оказалось, что величина тока при подключении вертушки и к «минусу» и к «плюсу» преобразователя не превышала 1 мкА и возникал некий запирающий эффект.

Шарик, предварительно заряженный отрицательно от эбонитовой палочки, потертой о шерсть, подключали к электрометру и опускали в зону вертушки. В случае подключения вертушки к «минусу» был обнаружен отрицательный заряд, а в другом случае – положительный.

Вертушка начинала вращаться, если ее ставили на дно жестяной банки из-под селедки, – запирающий эффект ослабевал.

Подсоединили ведро и вертушку к разным борнам преобразователя. Независимо от знаков на ведре и на вертушке, частота вращения вертушки возросла до 35 – 40 об/с (измеряли стробоскопом). При этом резко возрос и ток – он оказался более 20 мкА, а при изменении знака на вертушке гальванометр фиксировал изменение направления тока.

Эти опыты, казалось, и подтверждали ионный механизм вращения вертушки, и противоречили ему.

Затем мы решили провести опыты под колоколом вакуумной тарелки. При понижении давления в воздухе должен появиться тлеющий разряд, по форме которого можно определить характер движения электронов и ионов. От запирающего эффекта мы избавились, прилепив пластилином к внутренней стороне колокола по его окружности алюминиевую фольгу, которую провололочкой соединили с одним из электродов тарелки, а иглу с вертушкой укрепили на брусках в середине тарелки.

С помощью вакуумного насоса начали откачивать воздух из-под колокола, и при давлении около 0,3 атм появился тлеющий разряд. Наши ожидания полностью оправдались. Наблюдаемая форма канала тлеющего разряда позволила убедиться в том, что при «минусе» на вертушке с торцов концов вертушки срывается поток электронов, движущихся по параболе к фольге, а при изменении полярности электронные пучки вырываются из фольги и также по параболе летят к торцам концов вертушки. Особенно отчетливо это наблюдалось в момент включения преобразователя.

Все эти эксперименты снимались видеокамерой, что позволяло проводить просмотр в режиме паузы. Но, к сожалению, всей красоты наблюдаемых эффектов видеосъемка не дает.

Однако на этом мы не остановились.

Прикрепив пластилином к фольге по окружности гвоздики, остриями к центру вертушки на ее высоте, мы создали резко неоднородное поле и повторили весь эксперимент. В этом случае вышеописанные эффекты выглядели еще убедительнее и красивее. Для большей наглядности мы «застопорили» вертушку пластилиновым столбиком и получили возможность без помех разглядывать форму канала тлеющего разряда.

Затем мы повесили на иглу прямую проволочку и опять повторили весь эксперимент. Проволочка не вращалась, хотя мы и пытались вывести ее из состояния покоя, резко поворачивая тарелку. Возникла мысль, что вращение происходит за счет электронных пучков. Однако, когда под колоколом тарелки было создано разрежение на пределе возможностей насоса и были повторены опыты, оказалось, что вертушка не вращается! Небольшое свечение остатков газа явно говорило о том, что электронные пучки как шли, так и идут. Следовательно, вращение вертушки происходит не за счет электронных пучков?

Мы осторожно начали впускать под колокол воздух — при давлении около 0,1—0,12 атм вращение вертушки возобновилось. Значит, ее заставляют вращаться ионы?

И еще один опыт. Проволочку вблизи концов загнули кольцами в противоположных направлениях, причем так, чтобы концы упирались в проволочку (рис.2). При подаче на такую вертушку как «плюса», так и «минуса» вращение происходило против часовой стрелки. Но если концы колец не упираются в проволочку, вертушка при любом знаке вращения по часовой стрелке.

Затем мы провели серию наблюдений за поведением вертушки в ведре, заполненном водой или компрессорным маслом, при условии что вертушка и ведро подключались к разным борнам преобразователя.

Оказалось, что в воде вер-

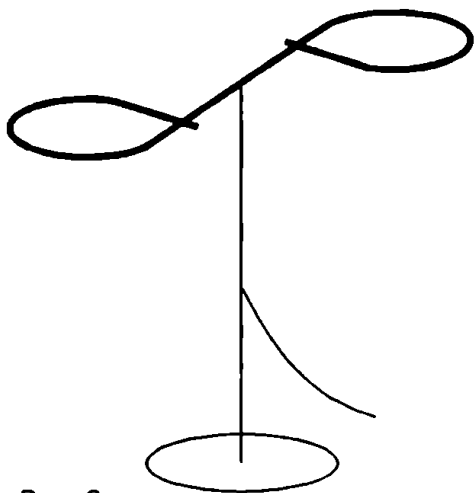


Рис. 2

тушка не вращалась. Возможно, это связано с тем, что относительная диэлектрическая проницаемость воды равна 81 и напряжение, равное 5000 В в воздухе, превращается в воде в ... 60 В. Для проверки мы поставили вертушку в пустое ведро и подали напряжение 44 В – вертушка не вращалась.

Относительная диэлектрическая проницаемость масла всего 2,5. В масле вертушка вращалась, правда весьма медленно, так как было велико механическое сопротивление движению. Вблизи концов вертушки возникало свечение, образовывался канал пузырьков (масло кипело) и наблюдалось движение масла от торцов концов вертушки.

И тут появилась идея. Похоже, что механизм вращения вертушки тот же, что и у прямоточного воздушного реактивного двигателя. В нем набегающий поток воздуха нагревается в камере сгорания, с большой скоростью выбрасывается из сопла и создает реактивную силу. У вертушки роль «камеры сгорания» играет электрический ток, который «разогревает» нейтральные молекулы, в результате чего их импульсы возле торцов концов вертушки возрастают – и вертушка вращается. Приток новых молекул обеспечивает окружающая среда.

Чтобы убедиться в правильности нашего предположения, надо было нагреть воздух возле торцов концов вертушки, не подключая ее к преобразователю, и посмотреть, будет ли вертушка вращаться. Горящие свечи не помогли. Тогда между электродами, расположенными в вертикальной плоскости и подключенными к преобразователю, создали искровой разряд, и в его зону поместили конец вертушки. Вращение началось, но ... происходило оно исключительно за счет электрического взаимодействия, порожденного электростатической индукцией.

Итак, пора делать выводы.

Во-первых, для вращения вертушки не является необходимым ни заострение ее концов, ни подключение к источнику постоянного напряжения.

Во-вторых, весьма вероятно, что вращение вертушки происходит за счет нескомпенсированного импульса газовых молекул, взаимодействующих с вертушкой. Большой импульс имеют молекулы газа, нагревающегося в зоне канала электрического разряда, вблизи торцов концов вертушки.

В-третьих, электрический ток в этих опытах оказывается необходимым и наиболее удобным средством нагревания среды.

Однако осталось сомнение: может быть, при вращении вертушки имеет место и ионный механизм, и тепловой? Но в какой пропорции?..

# ДОМАШНИЙ ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР

*В. Ланге*

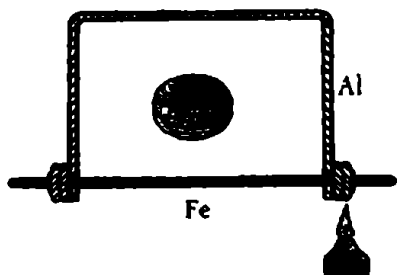
Сейчас совершенно немыслимо представить нашу жизнь без всевозможных приборов, приводимых в действие электрической энергией. В подавляющем большинстве случаев энергию дают тепловые электростанции (вклад гидроэлектростанций сравнительно мал, еще меньше дают ветросиловые электростанции, и уж совершенно незначительна доля остальных, в том числе используемых с недавнего времени в космосе так называемых солнечных батарей, производство которых обходится чрезвычайно дорого). Там химическая энергия, заключенная в топливе, вначале преобразуется в тепловую; тепло нагревает котлы; образующийся в них пар приводит в действие турбины, вращающие электрогенераторы; и только от них получается электрический ток, поступающий к нам по проводам. Длинная и сложная цепочка превращений!

Между тем, существует простой метод прямого превращения тепловой энергии в электрическую. И любой из вас может создать у себя дома установку, успешно решающую такую задачу. Для этого вам потребуется железный стержень толщиной 4–5 мм и длиной 10–15 см, примерно 30 см алюминиевой проволоки диаметром 2–3 мм, а также самый простой магнитный компас или просто магнитная стрелка.

Тщательно зачистите стержень и проволоку, а затем намотайте несколько витков проволоки на один из концов железного стержня. После этого отогните проволоку под прямым углом к стержню и на расстоянии 1,5–2 см от сгиба согните проволоку еще раз на 90°, чтобы она оказалась параллельной стержню. Затем, отмерив на ней 8–10 см, снова согните ее перпендикулярно стержню и оставшуюся часть намотайте на стержень. В результате получится прямоугольная рамка. Расположите рамку так, чтобы ее плоскость оказалась, во-первых, вертикальной и, во-вторых, параллельной магнитной стрелке

---

Опубликовано в «Кванте» №4 за 2001 год.



компыса, помещенного внутрь нее (см. рисунок).

Если нагреть одну из скруток в пламени двух-трех одновременно горящих спичек, можно увидеть, как стрелка начинает отклоняться (в наших опытах наблюдалось отклонение до  $30^\circ$ ). Это

косвенно свидетельствует о появ-

лении в рамке постоянного электрического тока, магнитное поле которого и вызывает отклонение стрелки. Стало быть, в этой установке действительно наблюдается прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

Впервые описанное явление наблюдал в 1821 году немецкий физик Томас Иоганн Зеебек (1770–1831), именем которого оно и было затем названо. «Он положил медную пластинку на пластинку сурьмы и посредством медной проволоки соединил пластинки с обмоткой «мультипликатора» [так во времена Зеебека называли один из видов гальванометра – В.Л.]. Когда он сжимал рукой металлические пластинки, возникал электрический ток. Если же сжимать пластинки, не касаясь их рукой, то тока не получалось. Зеебек тотчас понял, что причиной возникновения тока является тепло руки. Он нашел, что ток возникает в том случае, когда места прикосновения различных металлов имеют неодинаковую температуру», – так описываются опыты Зеебека по обнаружению термоэлектричества в замечательной книге Лакура и Аппеля «Историческая физика».

Сейчас термоэлектрическое явление используется главным образом для дистанционного измерения температуры. Что же касается его применения для получения электрического тока, то для металлических термопар КПД преобразования составляет всего около 0,1%. Гораздо выше коэффициент полезного действия полупроводниковых термопар, у которых он уже сейчас доходит до 15% и более. К сожалению, и это значение мало, да и стоимость полупроводниковых материалов пока еще чересчур велика. Неудобно и то, что развиваемая металлическими термопарами электродвижущая сила весьма мала: например, для пары «алюминий – железо», о которой говорилось выше, при разности температур между горячим и холодным спаями 1 К электродвижущая сила составляет всего около 15 мкВ. Для полупроводниковых термопар можно получить намного большие значения, но, как уже отмечалось, полупроводниковые материалы дороги и трудно обрабатываются.

В 1834 году французский физик и метеоролог Жан Шарль Пельтье (1785–1845) обнаружил второе термоэлектрическое явление (названное потом его именем), обратное эффекту Зеебека, – выделение или поглощение тепла в спае двух разнородных металлов. Явление Пельтье можно использовать, например, для постройки холодильных машин. И в этом случае КПД устройств будет на несколько порядков выше, если в них вместо металлов использовать полупроводниковые вещества.

И все-таки скажем немного о практической роли эффектов Зеебека и Пельтье в современной технике. Существует большое количество разнообразных устройств – как термоэлектрических генераторов, так и термоэлектрических холодильников, применяемых в различных ситуациях на земле, на море, в воздухе и в космосе. Для термогенераторов получила распространение такая схема: изотопный источник энергии и тепловыделяющая батарея, набранная из полупроводниковых термоэлементов. На основе эффекта Пельтье исправно работают микрохолодильники, которые находят широкое применение для охлаждения узлов электронных приборов, например матричных полупроводниковых приборов для визуализации изображения. Для снижения шумов светочувствительная микросхема этого прибора работает при температуре на несколько десятков градусов ниже нуля по Цельсию.

**ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»**

**Выпуск 2**

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

*Редактор В.А.Тихомирова*

*Литературный редактор Л.В.Кардасевич*

*Технический редактор Е.В.Морозова*

*Компьютерная группа*

*Е.А.Митченко. Л.В.Калиничева*

**ИБ № 59**

Подписано к печати 25.06.02. Формат 84×108 1/32. Бум. офс. нейтр.

Гарнитура кудряшевская. Печать офсетная. Объем 8 печ.л.

Тираж 37/3 экз. Заказ 3325 .

119296 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