



Ч. Б О Й С
МЫЛЬНЫЕ
ПУЗЫРИ



ДЕТИЗДАТ ЦК ВЛКСМ
1937

53

Б 377

ШКОЛЬНАЯ БИБЛИОТЕКА

Г. БОЙС

МЫЛЬНЫЕ ПУЗЫРИ



**ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ
ВСЕСОЮЗНОГО ЛЕНИНСКОГО КОММУНИСТИЧЕСКОГО СОЮЗА МОЛОДЕЖИ
ИЗДАТЕЛЬСТВО ДЕТСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1937 ЛЕНИНГРАД**

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Я советую молодым людям постараться повторить все описанные здесь опыты; они увидят, что во многих случаях для этого не требуется ничего, кроме стеклянной или каучуковой трубки или других предметов, которые так же легко достать. Я думаю, что их первоначальные затруднения будут вознаграждены дальнейшим легким успехом; и если, вместо того чтобы отчаиваться при первых неудачах, они постараются повторить опыт при помощи лучших из находящихся в их распоряжении средств, то самые трудные опыты станут для них самыми интересными.

МЫЛЬНЫЕ ПУЗЫРИ И ОБРАЗУЮЩИЕ ИХ СИЛЫ

ВВЕДЕНИЕ

«Выдуйте мыльный пузырь и смотрите на него; вы можете заниматься, может быть, всю жизнь изучением этого пузыря, не переставая извлекать из него уроки физики».

Кельвин, «Величина атомов»

Не думаю, чтобы среди вас нашелся хоть один, кто когда-нибудь не занимался пусканием мыльных пузырей и, любуясь совершенством их формы и дивными переливами цветов, не задавался вопросом, почему с такой легкостью можно вызвать к жизни эти великолепные явления.

Надеюсь, что никому из вас еще не наскучило пускать мыльные пузыри, и я рассчитываю показать вам, что простой мыльный пузырь представляет гораздо больше поучительного, чем это часто думают.

Восхищение и удивление мыльными пузырями, которые так великолепно изобразил на своей известной картине Миллэ, я надеюсь, не исчезнут после этих лекций; я полагаю, вы сами увидите, как ваше удивление будет расти при более близком знакомстве с этими явлениями. Плато в своем знаменитом труде «Статика жидкостей» упочинает о хранившейся в парижском Лувре этрусской вазе, на которой были изображены дети, пускающие мыльные пузыри. Однако, Плато говорит, что ни у одного классического автора нет упоминания о таких развлечениях, и только два намека на них встречаются у Овидия и Марциала. Напрасно я старался разыскать эту вазу в Лувре. Мне не удалось ее найти. Возможно, что она оказалась поддельной и была удалена из коллекций музея.

Быть может, некоторые из вас пожелают узнать, почему я выбрал предметом своих бесед мыльные пузыри; охотно удовлетворю их желание. Правда, есть множество вещей, еще более удивительных и увлекательных, но силы, образующие мыльные пузыри, тесно связаны с окружающими нас повседневными явлениями. Мы не можем налить воды из кувшина или из чайника, мы не можем ничего проделать с какой бы то ни было жидкостью, чтобы не привести в действие эти силы. Ваши собственные наблюдения не раз заставят вас вспомнить о том, что вы услышите и увидите в этой аудитории; но — и это, быть может, важнее всего — многие из вещей, которые я намерен вам показать, настолько просты, что вы сумеете сами без всяких приборов воспроизвести их у себя дома; а это, вы увидите, гораздо интереснее и поучительнее моих лекций.

Я хотел бы коснуться здесь еще одного вопроса, а именно — для чего я вообще показываю опыты. Вы, конечно, не задумываясь, ответите, что без опытов лекции были бы очень скучны. Это, может быть, и верно, но это не единственное основание. Когда перед нами возникает какой-нибудь новый вопрос, то открываются к его разрешению два пути. Мы можем обратиться к кому-нибудь, кто знаком с этим предметом, или же поискать ответа в книгах, написанных учеными; это очень хороший путь, если при этом нам посчастливится напасть на сведущего человека или дельную книгу; но мы можем избрать и другой путь, а именно — путь собственного опыта: мы можем добиться разгадки своими силами. Опыт, или эксперимент, — это вопрос, который мы ставим природе, и она всегда готова дать нам правильный ответ, если только мы правильно ставим вопрос, т. е. если мы умеем произвести надлежащий опыт. Опыт — это не фокус, не какая-нибудь хитрая штука, которая должна поразить вас; он показывается не ради красоты и не потому, что может внести разнообразие в монотонность лекций; если некоторые из моих опытов красивы или могут сделать беседу менее скучной, тем лучше; но главное их значение не в этом: они должны дать вам возможность самим получить правильные ответы на ваши вопросы.

УПРУГАЯ ПЕРЕПОНКА НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

Я начну с явления, которое вы все, вероятно, видели десятки раз, не подозревая, что имеете дело с настоящим физическим опытом. Вот у меня обыкновенная кисточка, какую употребляют для рисования красками. Как сделать, чтобы волоски кисточки слиплись и образовали заостренный кончик? Вы скажете, надо кисточку смочить, и тогда ее волоски слипнутся, потому что будут мокрыми. Хорошо. Попробуем произвести опыт. Так как кисточка мала и плохо видна сидящим далеко, я помещаю ее перед фонарем, и теперь вы все видите ее в увеличенном виде на экране (рис. 1, слева). Сейчас она суха, и волоски ее видны в отдельности. Теперь я погружаю кисточку в воду, вынимаю ее, и, как мы ожидали, волоски слипаются (рис. 1, справа), потому что, как мы обыкновенно говорим, кисточка мокрая. Теперь я опускаю кисточку в воду и оставляю ее там; и что же — волоски совсем не слипаются (рис. 1, посередине), а ведь они, несомненно, мокрые, раз они находятся в воде. Очевидно, что наше обычное объяснение этого явления не вполне точно. Этот опыт, не требующий для своего выполнения ничего, кроме кисточки и стакана воды, показывает, что волоски кисточки слипаются не



Рис. 1

только потому, что они мокрые, но еще по какой-то другой причине, которая нам еще не известна. Он показывает также, что довольно распространенное мнение, будто мы не в состоянии открыть глаза под водою, не основывается на фактах. Часто утверждают, что, когда мы ныряем в воду с закрытыми глазами, мы не можем как следует видеть, открывая глаза под водою, потому что вода будто бы склеивает ресницы; а потому, чтобы видеть под водой, рекомендуется нырять с открытыми глазами. В действительности же ничего подобного нет; совершенно безразлично, будете ли вы нырять с открытыми или закрытыми глазами, вы можете открыть их под водою и будете видеть так же хорошо, как и в первом случае. На примере нашей кисточки мы убедились, что вода сама по себе не вызывает слипания волосков, пока кисточка находится в воде, но, как только мы вынем ее из воды, волоски слипаются. Итак, хотя этот опыт и не объяснил нам причины слипания волосков, он нам показал по крайней мере, что обычное объяснение не совсем верно.

Произведем теперь другой опыт, такой же простой, как и предыдущий. Вот у меня трубка, из которой медленно, не сплошной струей, а по капелькам, вытекает вода; каждая капля медленно нарастает, пока не достигнет известной предельной величины и не оторвется сразу. Обращаю ваше внимание на то, что всякий раз, когда капля отрывается, она имеет одну и ту же величину и одну и ту же форму. Это не может быть делом простой случайности; должна существовать какая-нибудь причина, обуславливающая предельный размер и форму капли. Почему вообще вода держится на кончике трубки? Ведь вода обладает тяжестью и стремится упасть, однако, не падает сразу: она прилипает к кончику трубки и держится на нем, пока количество ее не достигнет определенной величины, а тогда капля сразу отрывается, как будто то, что держало воду, оказалось недостаточно крепким. Один ученый тщательно вычертил в увеличенном масштабе точные формы капли при различной ее величине, и этот рисунок перед вашими глазами (рис. 2, слева). Этот рисунок может натолкнуть на мысль, что вода как будто подвешена в упругом мешочке, и этот мешочек разрывается или от-

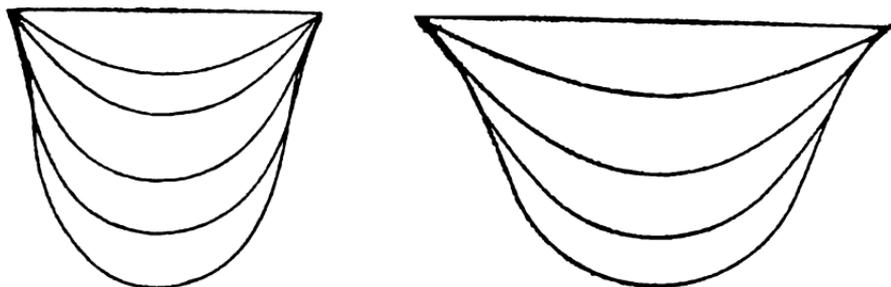


Рис. 2.

рывается, когда вес воды превосходит предел его прочности. Правда, на деле такого мешочка не существует, а все же меняющаяся форма капли сама по себе уже вызывает у нас представление об упругом, постепенно растягивающемся мешочке. Чтобы показать вам, что это вовсе не плод воображения, я сделаю следующий опыт. На треножнике я укреплю большое деревянное кольцо, которое затяну тонкой резиновой перепонкой. Станем теперь понемногу напускать воду из трубки на эту перепонку, и вы увидите, как перепонка станет постепенно растягиваться от увеличения веса воды. Присмотритесь внимательнее, и вы увидите, что резиновая перепонка принимает как раз те формы, какие были изображены на нашем рис. 2, слева. По мере того как вес воды увеличивается, перепонка растягивается, и теперь, когда в ней содержится около ведра воды, видно, что в таком состоянии она уже не может оставаться: она напоминает каплю воды перед самым моментом ее отрывания (рис. 2, справа). Если еще немного прибавить воды, наша искусственная капля сразу меняет свою форму (рис. 3), но не отрывается, как настоящая, потому что ее удерживает резиновая перепонка. Когда мы дошли до известной границы, она перестает растягиваться и может выдержать большое давление, не изменяя формы. Поэтому теперь она все время будет сохранять форму капли воды в самый момент ее отрывания. Теперь я стану посредством сифона понемногу удалять воду из этого упругого мешка, и капля снова начнет медленно сокращаться. Итак, в данном случае мы своими глазами видели тяжелую жидкость в упругом мешке. Обыкновенная капля воды отличается

от этой «искусственной капли» размерами да еще тем, что ее упругий мешочек невидим. А раз две капли ведут себя почти в точности одинаковым образом, мы, естественно, можем ждать, что их форма и движения обуславливаются одной и той же причиной и что маленькую водяную капельку поддерживает нечто вроде той резиновой перепонки, какую мы только что видели.

Посмотрим теперь, какое это имеет отношение к первому опыту с кисточкой. Этот опыт показал нам, что волоски кисточки слипаются не просто потому, что они мокры; необходимо еще, чтобы кисточка была вынута из воды, или, иными словами, нужно, чтобы у нас получился поверхностный слой, или водяная оболочка, и только тогда волоски слипнутся вместе. Если мы предположим, что поверхностный слой воды подобен упругой перепонке, тогда оба опыта — с мокрой кисточкой и водяной каплей — получают свое объяснение.

Попробуем сделать другой опыт, чтобы посмотреть, не будет ли вода и в других случаях обнаруживать такие свойства, которые приводили бы нас к заключению, что у нее существует невидимая упругая перепонка.

Вот у меня прибор, устроенный следующим образом. Длинный металлический стержень пропущен через полый стеклянный шарик, прикрепленный к стержню сургучом, так что вода не может проникнуть в шарик. Книжнему концу стержня прикреплен свинцовый груз, а недалеко от верхнего конца припаяна перпендикулярно к стержню металлическая сетка. Если опустить наш аппарат в сосуд с водою, он будет плавать стоймя, причем сетка должна находиться над водою. Чтобы сделать движения аппарата более заметными, к верхнему концу стержня прикреплен бумажный флажок (рис. 4).

Теперь погрузим наш прибор так, чтобы сетка оказалась под водой, и снова отпустим его. Что произойдет? Если поверхность воды в самом деле обладает свойствами упругой перепонки, она должна помешать прибору с сеткой подняться вверх в свое прежнее положение. Я отпускаю прибор, и, вместо того чтобы вы-

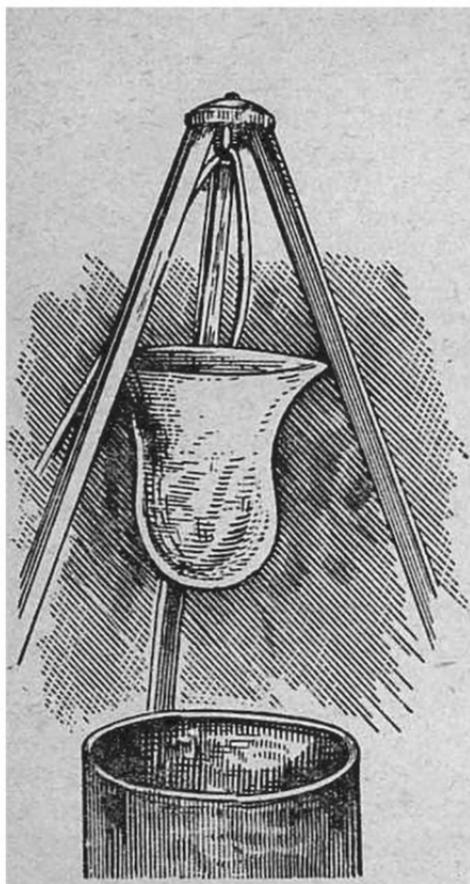


Рис. 3.

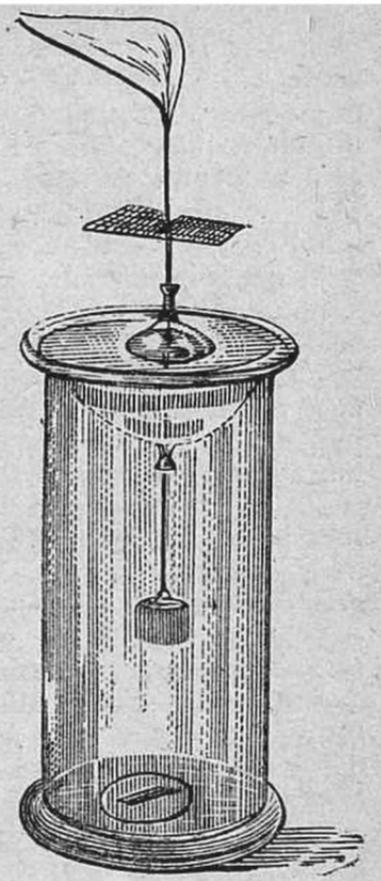


Рис. 4.

скочить наверх, как было бы, если бы ему ничто не мешало, он остается в воде, удерживаемый этой перепонкой. Когда я взбалтываю воду так, чтобы освободился один угол сетки, тогда, как вы видите, аппарат немедленно выпрыгивает вверх. Вы можете убедиться, что эта перепонка на поверхности воды должна быть довольно прочной, так как, чтобы погрузить аппарат в воду, нам нужно положить на сетку гирьки весом приблизительно в 7 граммов.

К этому прибору, который был впервые описан физиком Ван дер-Менсбрюге, я обращусь снова через несколько минут.

вам, что на поверхности чистой, прозрачной воды имеется особый упругий слой, подобный упругой перепонке. Вот у меня маленькое ситечко, сделанное из проволочной сетки, достаточно крупной, чтобы через ее отверстия могла проходить обыкновенная булавка. Между прочим, заметим, что в дне ситечка имеется около одиннадцати тысяч таких отверстий. Далее, как вам известно, чистая проволока смачивается водой, т. е., вынутая из воды, она оказывается мокрой; но бывают вещества, как, например, парафин, которые не смачиваются водой: вода не прилипает к парафину, в чем вы можете убедиться сами, погрузив парафинную свечу в воду. В расплавленный на сковороде парафин я и опустил эту сетку, чтобы вся она покрылась тонким слоем парафина; но, чтобы парафин не залепил отверстий, я хорошенько встряхну ее, пока парафин еще не застыл. Вы видите на экране, что все отверстия, за исключением одного-двух, остались открытыми и что обыкновенная булавка свободно проходит сквозь них. Наш прибор готов. Итак, если поверхность воды обладает подобием упругой перепонки, для разрыва которой необходима сила, воде будет не так-то легко вытечь через эти отверстия, она вообще не будет протекать через них, пока ее не заставят, потому что, чтобы пройти на другую сторону, воде нужно разорвать свою упругую оболочку в каждом отверстии. Вы понимаете, что это рассуждение правильно только в том случае, если вода не может притти в тесное соприкосновение с проволокой, т. е. не смачивает ее. Я стану наливать теперь в ситечко воду, и, чтобы помешать ей ударяться о дно с большой силой, что заставило бы ее пройти насквозь, я кладу на дно маленький кусочек бумаги и лью воду на бумагу, которая и разбивает струю (рис. 5). Вот я налил в ситечко около полстакана воды и мог бы налить еще больше. Я вынимаю бумажку — и ни одна капля не проходит насквозь. Но стоит дать толчок ситечку, вода пробьется сквозь дно и быстро выльется вся.

Если теперь встряхнуть воду из ситечка, можно будет пустить его плавать по воде, потому что вес

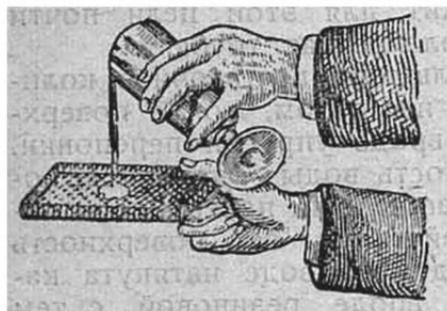


Рис. 5.



Рис. 6.

его недостаточен для того, чтобы разорвать перепонку, затягивающую все отверстия. Вода не проходит насквозь, и ситечко плавает на воде, хотя, как я уже говорил, в его дне имеется одиннадцать тысяч отверстий, каждое такой величины, что через него может пройти обыкновенная булавка.

Это явление было использовано для фабрикации тканей, свободно пропускающих воздух и водяной пар, но не проницаемых для воды. Сквозь кусочек такой ткани легко задуть свечу, но зато, сложенная в виде мешка, она держит налитую в нее воду.

Я хочу привести еще один пример, подтверждающий существование такой упругой перепонки на поверхности воды. Попробуйте налить воду из стакана в узкогорлую бутылку. Вы знаете, что если вы будете наливать медленно, то почти вся вода станет стекать по стенке стакана и будет литься мимо бутылки; если же вы станете лить быстро, то в узком горлышке бутылки нехватит места сразу для большого количества воды, и она опять-таки прольется мимо. Но если вы возьмете какой-нибудь прутик или стеклянную палочку и прислоните ее к краю стакана, то вода будет стекать по палочке в бутылку и ничего не прольется (рис. 6); вы можете даже держать палочку наклонно,

как это я делаю сейчас, и вода все же будет течь по палочке, потому что упругая перепонка внешнего слоя образует своего рода трубку, которая не дает воде проливаться. Этот способ может пригодиться в деревне, когда нужно провести воду из жолоба под крышей в поставленные внизу ушаты.

Какая-нибудь палка служит для этой цели почти так же хорошо, как и металлическая труба.

Итак, я полагаю, мы наблюдали достаточное количество фактов, убеждающих нас в том, что на поверхности воды имеется нечто вроде упругой перепонки. Я хочу сказать, что поверхность воды — это та же вода; но вода внутри своей массы и на поверхности обладает неодинаковыми свойствами: ее поверхность проявляет себя так, как будто на воде натянута какая-то упругая перепонка, вроде резиновой, с тем только отличием, что эта перепонка обнаруживает способность беспредельно растягиваться, тогда как резина таким свойством не обладает.

КАПИЛЛЯРНЫЕ ПОДНЯТИЯ И ПОНИЖЕНИЯ

Постараемся теперь понять, почему в узких трубках вода не устанавливается на уровне, который она имела бы в широком сосуде, а поднимается выше. Я поместил здесь, перед фонарем, сосуд с водой, окрашенной в синий цвет, чтобы вы лучше могли видеть все, что с нею происходит. Затем я опускаю в воду довольно узкую стеклянную трубку, и вода немедленно устремляется вверх, поднимаясь приблизительно на сантиметр над общим уровнем. Трубка внутри мокрая. Поэтому упругая перепонка поверхности воды прилипает к трубке и приподнимает воду, пока вес воды, поднятой над общим уровнем, не уравновесит силу этой перепонки¹. Когда я беру трубку, с просветом приблизительно вдвое большим, чем у предыду-

¹ Слой воды, облегающий трубку изнутри, и поверхность водяного столбика образуют одну жидкую пленку, и она поднимает уровень воды в трубке. — Ред.

щей, то поднимающая воду сила, которая действует по всей окружности трубки, должна поднять вдвое большее количество воды, однако, вода не поднимается на высоту вдвое большую, потому что в широкой трубке и воды больше, чем в узкой. Вода даже не достигает той высоты, на какой она стояла в более узкой трубке, потому что если бы это произошло, то вес поднятой воды был бы больше, чем прежде, в четыре раза, как легко понять на основании простых геометрических правил, а не в два только раза, как вы, может быть, сначала подумали. Действительно, в широкой трубке вода поднимается только на половинную высоту, и теперь, когда обе трубки помещены рядом, вы можете видеть, что в узкой трубке вода стоит в два раза выше, чем в широкой трубке. Равным образом, если бы я взял трубку толщиной в волос, то вода в ней стояла бы соответственно выше. Вот почему это явление называется капиллярностью, от латинского слова *capillus* — волос, так как оно особенно заметно в очень тонких трубках волосного диаметра.

Предположим теперь, что у вас имеется большое число трубок разного размера и вы разместили их в ряд по диаметру, начиная с самой узенькой; тогда очевидно, вода будет стоять выше всего в самой узкой трубке и все ниже и ниже в каждой из следующих трубок по мере увеличения их диаметра (рис. 7). Наконец, когда мы дойдем до самой широкой трубки, мы не в состоянии будем заметить в ней какое-нибудь повышение уровня воды. Тот же самый результат вы можете легко получить, если просто возьмете две четырехугольные стеклянные пластинки и поставите их друг к другу ребром, поместив между ними спичку или другую тоненькую палочку так, чтобы они расходились на небольшое расстояние у одного края и сходились до соприкосновения на другом. Скрепить пластинки можно с помощью надетого на них резинового кольца. К этому прибору подводится подкрашенная вода, и вы сразу видите, что вода вползает к верхнему краю пластинок на том конце, где они касаются друг друга своими ребрами, и по мере увеличения расстояния между пластинками уровень воды:



Рис. 7.

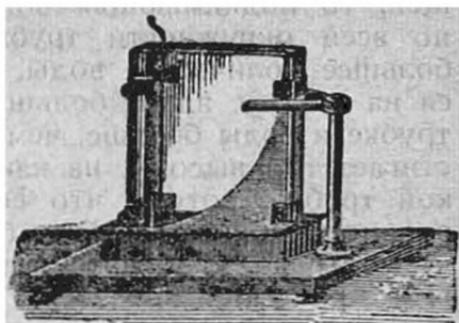


Рис. 8.

постепенно понижается; в результате поверхность жидкости в месте соприкосновения со стеклом образует красивую правильную кривую линию, которую математики называют равносторонней гиперболой (рис. 8). Мне следовало бы сейчас сообщить некоторые сведения относительно этой и некоторых других кривых, однако, я теперь могу только установить, что гиперболоа здесь возникает потому, что, в то время как расстояние между пластинками увеличивается, высота слоя жидкости становится меньше, иначе говоря, причина образования гиперболоа связана с таким явлением: вес столбика жидкости, поддерживаемого какой-либо частью кривой, повсюду остается одинаковым.

Если бы пластинки и трубки были сделаны из материала, не смачиваемого водой, тогда действие поверхностного натяжения привело бы к прямо противоположным результатам. Поверхность жидкости в узком месте оказалась бы опущенной и притом тем больше, чем уже промежуток между пластинками. Это явление затруднительно наблюдать, пользуясь парафиновыми пластинками или трубками и водой; поэтому мы возьмем другую жидкость — такую, которая не смачивает чистого стекла, — ртуть. Ртуть непрозрачна, и мы не увидим понижения уровня жидкостей в узкой трубке по сравнению с уровнем ее в широком сосуде. Чтобы наблюдать это явление, мы возьмем две соединенные друг с другом трубки, широкую и узкую.

Нальем теперь в них ртуть, и мы увидим, что в узкой трубке уровень ртути ниже (рис. 9, справа), чем в широкой, тогда как в таком же приборе с водой дело обстоит как раз наоборот (рис. 9, слева).

Упругое натяжение пленки, или так называемое поверхностное натяжение, очень невелико по сравнению с большими силами, но оно становится заметным, когда мы имеем дело с маленькими и легкими предметами. Те из вас, кому приходилось жить в деревне и проводить время на берегу ручья, не раз, конечно, наблюдали, как водомерки и другие маленькие существа бегают по поверхности воды, не погружаясь в нее.

По какой-то причине лапки их не смачиваются водой, отчего под каждой из лапок образуется маленькая ямка. Дно этой ямки, подтягиваемое стенками кверху, поддерживает тяжесть водомерки. Отсюда можно заключить, что вес насекомого в точности равен весу воды, которая потребовалась бы, чтобы заполнить ямки до общего уровня. Одному ученому удалось чрезвычайно остроумным способом измерить силу, с какой водомерка давит на воду каждой из своих лапок. Он сфотографировал тень от насекомого и от ямок под его лапками на белом фарфоровом блюде с водой. Затем он прикреплял лапку водомерки к чашке очень чувствительных весов, этой лапкой производил давление на воду с различной силой и снова фотографировал тень от ямки для каждой степени давления. Таким путем он составил целую таблицу и, пользуясь ею, мог определить величину давления одной лапки водомерки, сравнивая величину тени от ямок с размерами теней, показанными на таблице. Он мог даже проследить, в каком порядке водомерка переставляет свои лапки.

Другой ученый описал од-

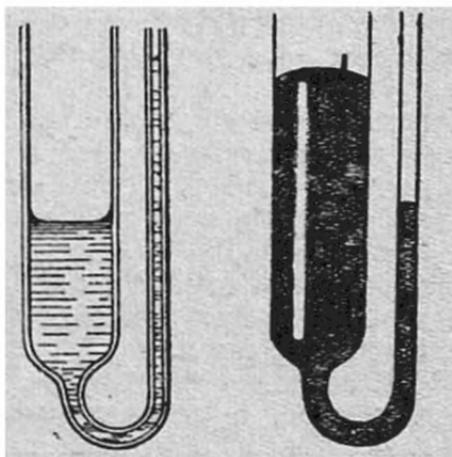


Рис. 9.

ного паука¹, который сплетает под водой особую сетку — паутину. Эта паутина не пропускает сквозь себя воздух так же, как не пропускает воду сито, которое не смачивается водой. Паук отправляется на поверхность воды за воздухом, уносит его вниз в виде пузырька и освобождает под паутиной. Таким образом здесь мало-помалу образуется целый резервуар воздуха, которым и дышит паук.

Подобно водяным паукам и насекомым, бегающим по воде, свойствами упругой водяной перепонки пользуются и некоторые живущие в воде личинки. Обыкновенный комар кладет свои яйца в стоячую воду и, повидимому, особенно любит кадки с водой и бассейны в садах и теплицах. Из этих яиц в свое время появляются личинки, соответствующие шелковичным червячкам, личинкам мошек или гусеницам бабочек. В теплую погоду вы можете видеть тысячи таких личинок в обыкновенных кадках с дождевой водой. Тут вы заметите маленькие темные существа, которые плавают забавными скачками и скрываются на дно, если вы внезапно приблизитесь к воде и вспугнете их. Однако, если вы будете держаться спокойно, не пройдет много времени, как они снова выплывут на поверхность и, прикрепившись к ней, будут оставаться в висячем положении. Очень легко показать такие живые личинки на экране. Перед фонарем вместо прозрачной картинки я поместил плоский сосуд с водой, в котором плавают некоторое количество личинок. Вы видите, как они выплывают к поверхности и привешиваются к ней с помощью придатка вроде хвоста (рис. 10). Это дыхательная трубочка. Таким образом, хотя они тяжелее воды и должны были бы тонуть, дыхательные трубочки помогают им висеть у поверхности, дышать и питаться опавшими и гниющими листьями. Личинка, изображенная на рисунке слева оторвалась от поверхности и медленно падала на дно как раз в тот момент, когда производился фотографический снимок.

Если вы станете рассматривать поверхность воды например, в стакане, куда вы пустили несколько та

¹ *Argyroneta* («серебряная пряжа») — водяной паук. — Ред.

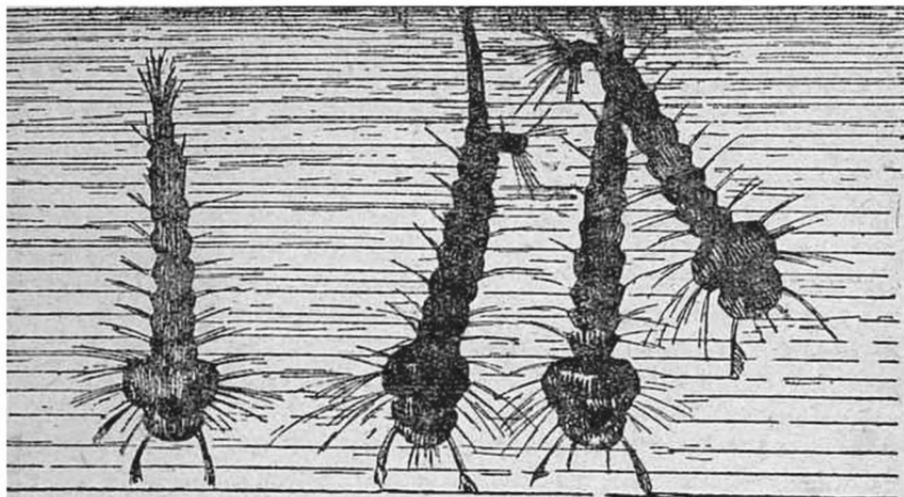


Рис 10.

ких личинок, то вы заметите в том месте, где висит личинка, маленькое углубление поверхности, вроде ямки. Вес воды, которая могла бы заполнить эту ямку, в точности равен той силе, с какой личинка тянет вниз. С помощью лупы можно рассмотреть это явление и вместе с тем убедиться, что за удивительное существо личинка комара.

Очень интересно остановиться на том, как появляется на свет муха *Simulia*. Куколка этой мухи чаще всего прикрепляется к подводным растениям в гнездышке, похожем на гнезда некоторых ласточек. Когда же ей приходит время выйти из оболочки, она скопляет воздух, выделяемый ею из воды, в своей трахее и раздувает оболочку, которую должна будет вскоре оставить. Оболочка лопаается, и муха всплывает на поверхность, заключенная в маленький воздушный пузырек. Этот пузырек через некоторое время тоже лопаается, и муха в первый раз расправляет свои лапки. С их помощью она бежит по поверхности воды до какого-нибудь твердого предмета и прикрепляется к нему до тех пор, пока не разовьются ее крылышки.

КАПИЛЛЯРНОЕ ПРИТЯЖЕНИЕ И ОТТАЛКИВАНИЕ

Рассмотрим теперь явления, которые происходят с двумя частично погруженными в воду пластинками, если вы поместите их очень близко одну к другой. Как я уже говорил, вода между ними поднимается. Те части обеих пластинок, которые с внешней и с внутренней стороны граничат с воздухом (обозначенные на рис. 11 буквой *a*), испытывают давление воздуха в двух противоположных направлениях, и поэтому они не стремятся приближаться друг к другу или удаляться друг от друга. Не испытывают такого стремления также и те части пластинок, которые с обеих сторон граничат с водой (*e* на рис. 11), так как на каждую из них давление воды действует с одинаковой силой в противоположные стороны. Иначе дело обстоит с давлением на те части (*b*), между которыми находится вода, но которые с наружной стороны соприкасаются с воздухом. Вода между пластинками в этой части находится под меньшим давлением, чем на окружающем уровне, так как она поднята над этим уровнем. Гидростатическое давление, как известно, увеличивается с глубиной; следовательно, вблизи поверхности жидкости между пластинками оно должно иметь меньшую величину, чем в более глубоких местах. Поэтому давление в массе воды, поднятой между пластинками, меньше внешнего атмосферного давления, вследствие чего пластинки приближаются друг к другу¹.

Правильность этого рассуждения можно показать на следующем опыте. Возьмем два пустых стеклянных шарика, настолько легких, что они плавают на воде. Они смачиваются водой, и потому вода между ними слегка приподнимается; поэтому они действуют друг на друга так же, как и пластинки, хотя и не так сильно. Можно заметить, что такие шарики, плавая по воде и будучи предоставлены самим себе, устремляются друг к другу со значительной силой. На рис. 11 изображена также пара пластинок, которые не смачива-

¹ Давление в воде, поднятой между пластинками, уменьшено потому, что ее тянет вверх поверхностная пленка. — Ред.

ются водой; рассматривая этот рисунок, можно легко понять, что и в этом случае пластинки приближаются одна к другой. Это можно доказать на опыте с двумя стеклянными пустыми шариками, предварительно

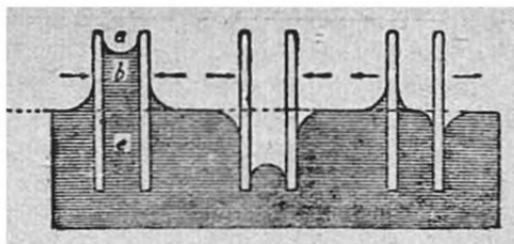


Рис. 11.

погруженными в расплавленный парафин; плавая по воде отдельно друг от друга, они притягиваются так же, как и шарики из чистого стекла.

Теперь мы доказали, что смачиваемая пластинка обнаруживает стремление двигаться в сторону более высокого уровня жидкости, а несмачиваемая — в сторону более низкого уровня, если по обе стороны пластинки разность уровней вызвана действием капиллярных сил. Поместим теперь рядом друг с другом одну смачиваемую пластинку, а другую несмачиваемую; тогда уровень жидкости между пластинками стоит по отношению к несмачиваемой выше, а относительно смачиваемой ниже, чем снаружи (см. также рис. 11); вследствие этого пластинки стремятся удалиться одна от другой. Поэтому, если в воде плавают два стеклянных шарика, один из которых покрыт парафином, а другой — нет, то между ними происходит отталкивание.

Обратим внимание на то, что вблизи погруженных пластинок поверхность жидкости искривлена: около смачиваемой она вогнута, около несмачиваемой выпукла. Это искривление и определяет ход всего явления, что мы можем показать на простом опыте. Чистый стеклянный шарик плавает в чистом сосуде, наполненном водой не до краев. Шарик движется в этом случае к краю сосуда; удержать его в середине небольшого сосуда совершенно невозможно, он всегда идет к краю в том или другом направлении. Если прибавим теперь в сосуд воды настолько, чтобы ее уровень стоял немного выше краев сосуда, то общая поверхность воды принимает выпуклую форму, между тем как вблизи шарика она вогнутая; теперь ша-

рикс стремится к середине сосуда, и его никак нельзя удержать у края. Если шарик покрыт парафином, результат получается обратный. Вместо парафинированного стеклянного шарика можно взять жирную иголку, которую с некоторыми предосторожностями можно заставить плавать в стакане с водой. Если стакан не совсем полон, иголка всегда уходит от его края; если же он слегка переполнен, то она стремится к краю и может даже через него перекатиться. Наоборот, пузырьки воздуха, прилипшие к стенке сосуда, в тот момент, когда вода поднимается выше края, очень быстро движутся от края к середине. Такое быстрое перемещение пузырьков лучше всего можно наблюдать так: стакан наполняется водой почти до краев, а затем повышают уровень воды, погружая в стакан пробку.

Из свойства поверхностного натяжения воды извлекает пользу и растение — обыкновенная ряска. Если еще не вся поверхность пруда заросла ряской, то листья ее поворачиваются друг к другу концами и притягиваются, боковые же стороны листьев, от которых отпочковываются молодые растения¹, развиваются свободно. У листа имеется центральный нерв, и «носок» и «пятка» его, если можно так выразиться, приподняты над общей поверхностью, отчего и водная поверхность около них, изгибаясь, приподнимается вверх.

Поэтому два листка притягиваются своими концами, как смачиваемые стеклянные шарики; боковые же края их, находясь на одном уровне с водой, остаются свободными. Прodelать опыт с ряской нетрудно. Это растение легко найти за городом. Возьмем стакан, наполненный водой таким образом, что у его краев поверхность воды искривляется книзу. Тогда легкие, смачиваемые водой предметы будут править посредине. Поместим теперь на поверхность несколько листков ряски, и мы увидим, как они притягиваются друг к другу своими концами. Если опустить в воду какой-нибудь смачиваемый ею предмет, то он заста-

¹ Листья ряски — на самом деле видоизмененные стебли. — Ред.

вит находящийся поблизости отдельный листок повернуться, подобно тому как магнит заставляет поворачиваться стрелку компаса. Раз вам удалось достать ряску, то стоит продержать ее несколько дней, чтобы понаблюдать процесс почкования и отделения новых растений.

До сих пор я не говорил о том, как велика сила, проявляемая этой упругой водяной пленкой. Измерения ее с помощью узких трубок, капель и другими способами показали, что она почти в точности равна 7,7 миллиграмма на один миллиметр при 0° Цельсия.

КАПИЛЛЯРНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Вот здесь вы видите другую трубку, совершенно такую же, как и первая, из которой мы выпускали водяные капли, но с другой жидкостью — винным спиртом. И вы сразу же видите, что капли спирта в момент отрывания от трубки далеко не так велики, как капли воды. Спирт легче воды, поэтому его перепонка должна быть значительно слабее, чем у воды (рис. 2, справа).

Это замечание мы легко можем проверить. Есть такая игра: двое тянут за веревку, стараясь перетянуть друг друга, и нетрудно угадать, кто из них сильнее. Пусть теперь спирт и вода поиграют в эту игру. Чтобы лучше видеть воду, я окрасил ее в синий цвет и налил тонким слоем в белый плоский сосуд. Сейчас перепонка на поверхности воды тянет равномерно по всем направлениям, и мы не замечаем никаких перемен. Если я налью посередине несколько капель спирта, то по одну сторону линии, разделяющей воду и спирт, будет тянуть спирт внутрь, по другую вода — наружу, и результат перед вашими глазами. Вода оказалась победительницей: она разбегается по всем направлениям, увлекая с собой некоторое количество спирта, а дно сосуда оказывается сухим (рис. 12).

Эта разница в поверхностном натяжении спирта и воды или воды, содержащей в растворе некоторое количество спирта, и представляет собой причину ин-

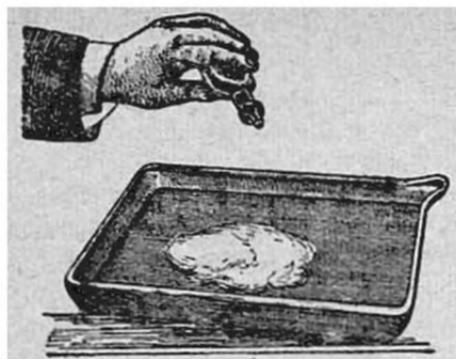


Рис. 12.



Рис. 13.

тересного явления, которое можно наблюдать на стенках бокала с крепким вином, например портвейном. Жидкость вползает по стенкам бокала, собирается там в капли, которые падают назад, и так продолжается довольно долго. Это явление было объяснено профессором Джемсом Томсоном следующим образом. Тонкий слой вина, прилегающий к стенкам бокала, соприкасаясь с воздухом, теряет спирт путем испарения значительно быстрее, чем вино в бокале. Вследствие этого вино в тонком слое становится беднее спиртом и богаче водой, чем нижележащие слои, а потому его поверхностная перепонка становится более сильно натянутой. Жидкость этого слоя поднимается вверх, пока ее не накопится столько, что она станет собираться в капли, которые будут стекать обратно, как вы можете видеть это на экране (рис. 13).

Известная вам жидкость эфир имеет также перепонку более слабую, чем вода. Очень небольшое количество эфира может произвести на поверхности воды заметное действие. Вот, например, проволочная сетка, которую я незадолго перед этим опустил под воду (рис. 4); поверхностная пленка все еще удерживает ее. Сила всплывания стеклянного шара гонит ее вверх, но этой силы недостаточно, чтобы прорвать водную оболочку. Нальем теперь в стакан несколько капель эфира и наклоним этот стакан над поверхностью воды, чтобы из него стали вытекать пары эфира (осторожнее, чтобы не вылилось ни одной капли жидкости), и что же — сейчас же на поверхности воды

сгущается достаточное количество эфира, чтобы ослабить прочность водяной оболочки, и прибор выпрыгивает вверх.

В жизни нам часто приходится иметь дело с явлениями, основанными на различии в натяжении поверхностных оболочек. Если на вашем платье образовалось жирное пятно, то его можно вывести при помощи бензина. Однако, если вы смочите пятно бензином и станете лить на это место чистый бензин, то результат будет тот, что на вашем платье жирный бензин, у которого поверхностное натяжение больше, смешается с чистым бензином. При этом загрязненный бензин возьмет верх и расползется во все стороны; чем больше вы будете лить бензина, тем шире будет расползаться жирное пятно. Но если вы пойдете правильным путем и сначала образуете вокруг жирного пятна кольцо чистого бензина и потом станете лить на пятно чистый бензин, тогда жирный бензин, стягиваясь от кольца чистого бензина к середине, соберется здесь, и отсюда весь жир можно удалить тряпочкой.

Однажды мне пришлось проделать этот трудный опыт над новым белым сатиновым костюмом, залитым супом из опрокинутой тарелки. Я разложил на земле (на открытом воздухе) несколько чистых тряпок и тщательно расправил поверх них испорченный жирными пятнами костюм. Затем, взяв почти полную бутылку чистого бензина, стал щедро поливать им платье, сначала образуя кольцо вокруг пятен, затем попадая на самые пятна, причем старые тряпки заменял новыми. Повесив костюм, я дал испариться излишку бензина, и в результате на костюме нельзя было открыть и следа пятен.

Между горячим и холодным жиром тоже есть разница, которую вы можете подметить, рассматривая горящую свечу. У самого пламени жир горячее, чем у наружного края свечи. Сила натяжения его поверхностной оболочки меньше, а потому здесь замечается непрерывное движение: горячий жир передвигается по поверхности от светильни к краям свечи, там он опускается и под поверхностью движется обратно, что можно видеть по маленьким пылинкам, плаваю-

щим в растопленном стеарине. Благодаря этому свеча сгорает равномерно.

Вам, вероятно, известен способ удаления с костюма жирных пятен стеарина горячим ножом или утюгом и пропускной бумагой.

Здесь происходит явление подобного же рода.

Плавающий на воде кусочек чистой камфары представляет собою другой пример движения, обусловленного изменением в силе натяжения водной оболочки, на которую действует растворяющаяся в воде камфара.

Наиболее удачный результат при опытах с камфарой получается, если взять большой сосуд с совершенно чистой водой и затем, держа камфару над водой, слегка соскабливать ее уголки ножом. Тогда крошечные кусочки камфары, падая на поверхность воды, начнут проявлять поразительную подвижность. Однако, вода должна быть для этого почти совершенно свободной от жира: простого прикосновения пальцем достаточно, чтобы прекратить движение кусочков камфары. Рэлей определил вес масла, «убивающего» камфару на поверхности воды в большой ванне, и нашел этим путем, что, когда слой масла едва достигает толщины в две миллионных миллиметра, камфара «умирает». Если для опыта не найдется достаточно чистого сосуда, то можно удовлетвориться кадкой, в которую стекала дождевая вода и выливалась из нее через края. Придет ли в голову хорошей хозяйке, что вся чистая посуда в действительности покрыта слоем жира, хотя и очень тонким?

Опыт с камфарой может убедить нас, что крошечная капелька масла распространяется почти моментально по поверхности воды в большом сосуде. Сила натяжения поверхностной оболочки чистой воды больше, чем вместе взятые силы натяжения масла в соприкосновении с воздухом и воды в соприкосновении с маслом. Поэтому-то масло распространяется сразу по поверхности воды, принимая те же цвета, как и мыльные пузыри, затем слой масла делается таким тонким, что и цвета пропадают.

Может быть, и всем знакомый, в высшей степени неприятный вкус касторового масла обуславливается

его свойством обволакивать всю полость рта; вероятно, и свойство имбирного вина ослаблять этот неприятный вкус зависит от того, что алкоголь вина уменьшает силу поверхностного натяжения слюны во рту, отчего масло уже не проникает во все уголки и складки, а проскальзывает в желательном направлении подобно устрице. Разумеется, вкус вина играет при этом большую роль, но его одного едва ли было бы достаточно, чтобы заглушить неприятный вкус касторового масла.

ПОЧЕМУ УТИХАЮТ ВОЛНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАСЛА?

Помимо свойства распространяться по поверхности воды, масло производит еще одно удивительное действие: оно препятствует образованию зыби под влиянием ветра. Когда волна, каких бы она ни была размеров, движется, ее крутая поверхность, находящаяся впереди гребня, сокращается, в то время как задняя поверхность растягивается. На этой увеличивающейся поверхности слой масла оказывается более тонким, и сила поверхностного натяжения воды здесь будет больше. Напротив, когда поверхность становится меньше, слой масла утолщается и сила натяжения водной оболочки ослабевает. Таким образом, на каждой стороне волны возникают силы, направленные на уничтожение волны. Правда, они мало ощутительны для больших волн, но они влияют тем заметнее, чем меньше волны. Вот почему волнение воды и влияние ветра на водную поверхность так сильно изменяются в присутствии слоя масла. Если кому-либо из вас приходилось продолжительное время плавать на яхте; тот мог наблюдать, как удивительно долго сохраняется гладкое пятно в том месте на поверхности воды, куда вы вылили масло из коробки от сардин.

Однажды я проделал такой опыт в очень ветреный день на пруду в Гайд-парке. На поверхность воды была вылита ложка оливкового масла. Здесь сейчас же образовалась большая полоса масла — от 20 до 30

метров в поперечнике, причем ясно можно было видеть, что слой масла препятствовал образованию зыби. Так как гладкая полоса была в тысячу раз больше в длину и в тысячу раз больше в ширину, чем ложка, то толщина слоя масла на поверхности воды должна была приблизительно составлять

$$\frac{1}{1\,000\,000}$$

часть толщины слоя масла в ложке, или около двух миллионных миллиметра. Таким образом, действие масла на волнующуюся поверхность пруда вполне очевидно.

Я не сомневаюсь, что стоит только купающимся по утрам посмотреть в ветреный день по направлению ветра на воду, как они увидят, что их тело производит то же действие, что и масло. По той же самой причине и след от парохода виден так долго на воде в форме гладкой ленты.

Приведу еще лишь один пример. Когда вы пишете акварельными красками на жирной бумаге или на некоторых полированных поверхностях, то краска не ложится ровно на бумагу, а собирается в капельки. Но достаточно прибавить к ней очень немного бычьей желчи, чтобы она стала ложиться превосходно; желчь настолько уменьшает поверхностное натяжение воды, что она начинает смачивать такие поверхности, которых не смачивает чистая вода. Это ослабление поверхностного натяжения вы можете наблюдать, если в третий раз воспользуюсь нашей проволочной сеткой. Эфир теперь испарился, и я снова могу погрузить сетку в воду так, что она будет удерживаться под поверхностью. Но стоит мне коснуться воды кисточкой, смоченной желчью, и сетка, как раньше, сразу выскакивает наверх.

Ослабление поверхностного натяжения воды можно показать еще на одном простом опыте. Вот у нас в стакане несколько личинок комара; как только мы коснемся поверхности чистой воды мылом или желчью, мы увидим, что личинки не в состоянии будут более удерживаться у поверхности своими дыхательными трубочками. Если на поверхность воды в бассейнах, прудах и других водоемах налить керосина, масла и т. п.,

личинки комаров и москитов погибнут. Этот способ теперь широко применяется с целью борьбы с малярией и другими болезнями, происходящими от укусов комаров.

Нет никакой необходимости доказывать дальше, что поверхность жидкости проявляет в этом случае такие свойства, как будто она с некоторой, вполне определенной силой обтянута совершенно упругой перепонкой.

КАПЛИ ЖИДКОСТИ

Возьмем теперь немного воды, сколько может уместиться в ореховой скорлупе, и выльем воду. Разумеется, вода, ударившись о землю, расплеснется отдельными капельками. А теперь возьмем такое же количество воды и осторожно перенесем его в виде одной большой капли на кусок парафина, посыпанный сверху порошком ликоподия, который не смачивается водой. Что произойдет в этом случае? Вес капли прижмет ее к парафину и расплющит в плоскую лепешку. Что случилось бы, если бы можно было устранить действие тяжести? В этом случае капля испытывала бы действие только своей упругой оболочки, которая стремится придать капле такую форму, чтобы поверхность ее стала возможно меньшей. Она получила бы форму совершенно правильного шара, так как поверхность его и будет наименьшей из всех возможных при данном объеме. Например, если бы мы взяли капельку воды размером с булавоочную головку, тогда вес, побуждающий каплю падать вниз или сплющиваться, стал бы значительно меньшим, между тем как величина поверхностного натяжения осталась бы прежней и имела бы большую формирующую способность, как это мы увидим далее. Поэтому поверхностное натяжение стало бы оказывать на форму капли более заметное влияние. Мы можем, следовательно, ожидать, что при достаточно малых размерах капли формирующая сила поверхностного натяжения будет в состоянии почти всецело противодействовать весу капли, и потому маленькие капельки должны

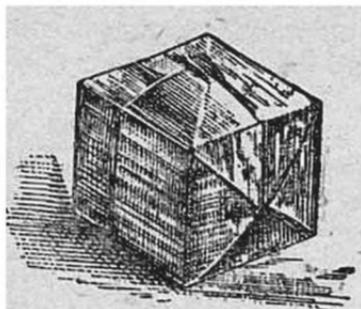


Рис. 14.

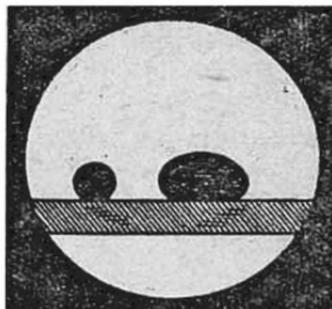


Рис. 15.

иметь вид почти совершенно правильных шариков. Если ход этих рассуждений покажется кому-либо трудным, то один очень простой пример легко разъяснит дело. Вероятно, многие из юных читателей этой книги знают, как делается из бумаги коробочка, изображенная на рис. 14.

Вот одна такая бумажная коробочка емкостью в полбутылки, сделанная из небольшого куса газетной бумаги. Вы можете наполнить водой такую бумажную коробочку, носить ее, швырять с большой силой, и прочность бумажных стенок будет достаточно, чтобы удержать воду, пока коробочка не стукнется обо что-нибудь острое, причем бумага, разумеется, лопнет и вода выльется. Если же сделать подобную коробку из целого листа газетной бумаги, то она едва будет в состоянии удержать вес налитой в нее воды. Такую коробку можно наполнить водой, переносить ее, уронить с некоторой высоты, но уже нельзя ни трясти, ни бросать. Совершенно по той же причине слабая перепонка жидкости не может оказать заметного влияния на форму большого количества жидкости, тогда как маленькая капелька под ее влиянием принимает такую правильную шарообразную форму, что на-глаз вы не обнаружите в ней никаких неправильностей. Еще лучше это можно наблюдать на капельках ртути. В большом количестве ртуть принимает вид лепешки, но, если вылить эту же ртуть на стол, чтобы она распалась на мелкие капельки, они примут совершенно правильную шарообразную фор-

му. То же различие можно наблюдать и на крупинках золота (рис. 15). Они теперь тверды, но предварительно были расплавлены, а потом затвердели. Из рисунка видно, что крупная капля золота сплющена собственным весом, а маленькая капелька представляется совершенно круглой. То же самое можно наблюдать и на капельках воды, если лить ее на поверхность стола, посыпанную лycopодием или другим веществом, не поддающимся смачиванию. Струйка воды, разбиваясь о поверхность стола, будет катиться по ней в виде маленьких правильных шариков. В жаркий день можно проделать этот опыт на пыльной дороге, брызгая на нее из лейки.

Если бы можно было устранить влияние веса жидкости, т. е. той силы, с которой она притягивается землей, то и большие капли принимали бы такую же правильную шарообразную форму, как и маленькие. Это было впервые показано на красивом опыте Плато. Он взял две несмешивающиеся жидкости, одинаково тяжелые, и поместил некоторое количество одной из них внутри другой. Спирт легче масла, тогда как вода тяжелее его, но надлежащая смесь спирта и воды так же тяжела, как и масло, а потому масло, помещенное внутри такой смеси, не будет стремиться ни всплывать вверх, ни опускаться на дно. Перед фонарем я установил стеклянный ящик, содержащий смесь спирта и воды, и с помощью трубки медленно вливаю внутрь этой жидкости масло. Вы видите, что, как только я удаляю трубку, масло принимает форму правильного шара с диаметром, определяющимся количеством масла (рис. 16). Теперь получилось два или три таких шара из масла совершенно правильной формы. Я хотел бы теперь обратить ваше внимание на то, что, когда я надавливаю с одной стороны на большой шар и затем предоставляю его самому себе, он восстанавливает свою прежнюю форму медленно, тогда как маленький шарик возвращается к своей правильной форме значительно быстрее. Есть еще один красивый опыт, который, хотя и не имеет прямого отношения к разбираемому нами вопросу, однако, вполне заслуживает того, чтобы показать его, тем более, что прибор вполне собран. Посредине стеклянного ящика

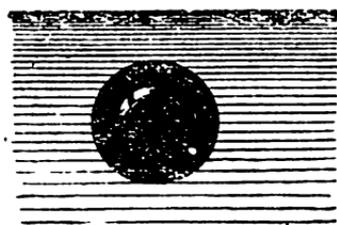


Рис. 16.

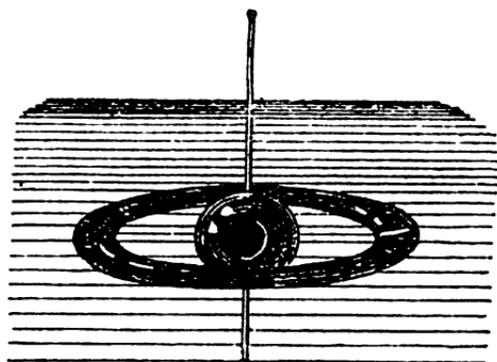


Рис. 17.

проходит ось с диском, к которому я подвожу большой шар масла так, чтобы диск оказался внутри него. Теперь, когда я начинаю медленно вращать диск, масло тоже приходит во вращательное движение. По мере увеличения скорости вращения масло стремится разлететься в разные стороны, но удерживается своей упругой оболочкой. В результате шар масла сплющивается у полюсов и принимает форму, подобную форме земного шара. При дальнейшем увеличении скорости стремление масла расширяться становится, наконец, слишком значительным, преодолевает силу упругой оболочки, и от масляного шара отрывается кольцо (рис. 17), которое снова сливается с оставшимся шариком, как только скорость уменьшится. Скорость вращения можно настолько увеличить, что кольцо разорвется на ряд шариков меньших размеров. Наблюдая красивый опыт Плато, невольно вспоминаешь о небесных телах, обращающихся вокруг солнца; здесь мы тоже видим центральное тело и ряд вращающихся шаров разных размеров, причем все они обращаются вокруг срединного тела в одном и том же направлении. Надо заметить, что силы, действующие в том и другом случае, совершенно различны, и то, что вы видите сейчас, не имеет ничего общего с солнцем и планетами.

Мы видели, таким образом, что большое количество жидкости может принять форму шара под влиянием своей упругой оболочки, если устранить, как в приведенном опыте, действие силы тяжести. Сила тя-

жести почти не играет роли, когда мы имеем дело с мыльным пузырем, потому что он чрезвычайно тонок и вес его совершенно ничтожен. В самом деле, всем вам прекрасно известно, что мыльный пузырь имеет совершенно правильную шарообразную форму, и теперь вы знаете, почему именно: причина заключается в том, что упругая перепонка, стремясь сократиться возможно сильнее, должна принять форму с наименьшей поверхностью при данном объеме, а такой формой оказывается шар. Добавим еще, что и здесь, как в случае с масляным шаром, большой мыльный пузырь будет восстанавливать свою форму значительно медленнее, чем маленький, если на стенки их надавить палочкой, завернутой во фланель или другую шерстяную материю.

Воспроизведение опыта с помощью спирта, воды и масла представляет известные трудности главным образом потому, что масло, имеющее ту же плотность, что и окружающая жидкость при данной температуре, становится легче, когда температура повышается, и тяжелее, когда она падает. С повышением температуры масло расширяется сильнее, чем смесь воды и спирта, вследствие чего и плотность его изменяется сильнее. В последней части этой книги я даю сведения о другой смеси жидкостей, которой я пользовался с хорошим результатом, но одна из них — сернистый углерод — обладает таким неприятным запахом и так легко воспламеняется, что эту смесь нельзя рекомендовать для широкого употребления.

Недавно найден другой, очень удобный и красивый способ для наблюдения капель жидкости. Самый подходящий для этого сосуд, который к тому же нетрудно достать, — это стеклянный колпак от столовых часов с плоскими боковыми стенками, чтобы избежать увеличения и искажения фигур, что неизбежно при наблюдении их через искривленные стенки круглого колпака. Надо приготовить раствор трех частей (по весу) обыкновенной соли в 100 частях воды; не следует брать соль с какими-либо примесями, которые не растворяются в воде и придают жидкости вид молока. Нужно взять простую, но совершенно чистую соль. Наполним теперь треть колпака этим раствором.

Затем будем осторожно, по стенкам, приливать к нему воду, чтобы она образовала слой поверх соляного раствора, затем, укрепив воронку с краном так, чтобы конец ее приходился несколько выше соляного раствора, станем медленно приливать через воронку жидкость, называемую ортотолуидином. Это жидкость красивого красного цвета, при температуре около 21° Цельсия она обладает плотностью, промежуточной между плотностью соляного раствора и воды. В результате может образоваться большая капля в пять или семь сантиметров в диаметре, и после удаления воронки она останется в покое в сосуде. При повышении температуры она немного поднимается, при понижении опускается.

Есть еще один подобный опыт. Берется сосуд с горячей водой при температуре между 77° и 82° Цельсия. В сосуд с водой подливают анилин. При температуре немного выше 63° Цельсия анилин обладает такой же плотностью, как и вода, но по мере повышения температуры он, расширяясь сильнее воды, становится легче ее, а при понижении температуры тяжелее ее. Анилин на поверхности воды охлаждается и сейчас же собирается в висячую каплю, которая отрывается от поверхности и падает на дно. Здесь анилин согревается, и вскоре вновь образуется большая капля, которая внезапно отрывается от дна и поднимается на поверхность¹. Можно проследить медленное отрывание капель и образование маленьких промежуточных капелек, о которых мы поговорим отдельно.

Интересно также наблюдать движение маленьких круглых «глазков» тех жидкостей, которые плавают на поверхности чистой воды; это движение становится более заметным, когда жидкости не вполне чисты. Некоторое время такой «глазок» имеет круглую форму и остается в покое, но потом он вдруг начинает как-то конвульсивно двигаться, принимает форму почки или разрывается на два или больше пятнышек.

¹ Опыт рекомендуется производить в высоком химическом стакане, который нагревается в песчаной бане. — Ред.

Когда на поверхности воды много таких «глазков», беспокойное движение их становится непрерывным.

Подобно кусочкам камфары, «глазок» немедленно прекращает двигаться, если только коснуться поверхности воды жирным предметом или кусочком мыла. Диски «глазков» тогда внезапно утолщаются в маленькие чечевицеобразные кружки и остаются в покое.

Нефть, как известно, не смешивается с водой, но отделяется от нее и плавает на поверхности. Если же в воде растворить некоторое количество мыла, тогда поверхностное натяжение раствора настолько ослабевает, что нефть отделяется от воды гораздо медленнее, если только она выделяется вообще. Травяные тли и другие вредные насекомые не любят жидкого мыла с керосином, а потому эта смесь с пользой применяется для защитного обрызгивания деревьев. Когда керосин легко выделяется из жидкостей, дерево, обрызганное им, само будет страдать не меньше, чем насекомые, но, если он останется в виде эмульсии в жидкости, дереву не причиняется вреда.

Главный результат, полученный нами из всех описанных наблюдений, следующий. Наружная поверхность жидкости обнаруживает такие свойства, как будто она выделяет из себя упругую оболочку; эта последняя, сокращаясь, стремится придать жидкости такую форму, чтобы поверхность ее стала наивозможно меньшей. Обычно вес жидкости, особенно если мы имеем дело с большим количеством ее, слишком велик по сравнению с небольшой силой упругой оболочки, и действие этой силы может остаться незамеченным. Действие тяжести может быть устранено погружением одной жидкости в другую, равной с ней плотности, и притом такую, которая не смешивается с первой. Влияние силы тяжести почти незаметно, если мы станем рассматривать очень маленькие капельки или пузырьки, потому что в этом случае вес тела ничтожно мал, тогда как упругая сила оболочки остается неизменной. Различные жидкости обладают перепонками с различной силой поверхностного натяжения. Когда две несмешивающиеся жидкости приводятся в соприкосновение одна с другой, иногда наблюдаются интересные явления.

МЫЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ, ИХ НАТЯЖЕНИЕ И КРИВИЗН

До сих пор я еще не показал на опыте, что мыльная пленка или пузырь в самом деле упруги, подобно куску растянутой резиновой перепонки.

Однако, прежде чем приступить к опытам, посмотрим сначала, с какого рода силами мы будем иметь дело. Если мы имеем чистую воду, то силы, действующие в противоположных направлениях на протяжении линии в один миллиметр, соответствуют весу в 7,7 миллиграмма. Величину эту очень легко определить измеряя высоту, на какую поднимается чистая вода в тонкой стеклянной трубочке.

Известно, что пузыри выдуваются из мыльного раствора, но не из чистой воды. Очень часто поэтому думают, что упругость и сила натяжения поверхностной пленки у мыльной воды должны быть больше чем у чистой. Однако, в действительности дело обстоит как раз наоборот, и в этом можно сразу убедиться, посмотрев, на какую высоту поднимается мыльный раствор в той же тонкой трубочке, в которой раньше поднималась вода. Оказывается, что мыльный раствор поднимается лишь на одну треть прежней высоты. Сила поверхностного натяжения у мыльного раствора немногим превосходит величину в 24 миллиграмма на один сантиметр, тогда как у воды она достигает величины в 7,7 миллиграмма на один миллиметр.

Мыльный пузырь образуется тонким слоем жидкости с двумя поверхностями, и каждая из них стремится сократиться с силой приблизительно в 24 миллиграмма на один сантиметр; поэтому мыльный пузырь стремится к сжатию с силой, несколько большей 48 миллиграммов на один сантиметр. Именно такова сила воздействия мыльной перепонки на предмет, к которому она прикреплена, что нетрудно показать различными способами. Самый простой, пожалуй, путь состоит в следующем. Привяжем совершенно свободно нитку поперек кольца и опустим кольцо в мыльную воду. Когда мы вынем кольцо из жидкости, окажется, что оно затянулось перепонкой, в которой наша нитка может двигаться совершенно свободно, как вы можете видеть на экране. Но стоит прорвать

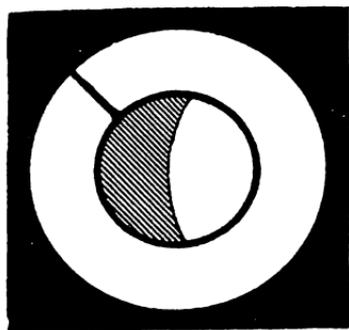


Рис. 18.

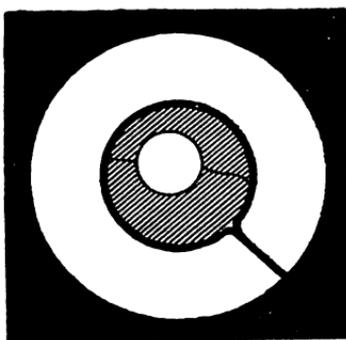


Рис. 19.

перепонку с одной стороны, как нить с другой стороны натянется перепонкой насколько возможно сильно и не будет висеть свободно, как прежде (рис. 18). Вы замечаете также, что нить образует часть правильного круга, потому что именно благодаря такой форме линии на одной стороне площадь оказывается возможно большей, тогда как на другой стороне, где находится перепонка, возможно меньшей. А вот другой опыт. К другому кольцу привязывается нить, раздвоенная на небольшом протяжении посередине. Если прорвать пленку между нитями, они сразу растягиваются в стороны и образуют правильный круг (рис. 19), потому что это и есть форма, делающая площадь внутри наивозможно большей, площадь же вне его оказывается наивозможно меньшей. Вы можете также и тут подметить, что хотя нельзя изменить форму круга, зато он может совершенно свободно двигаться внутри кольца, потому что при этом движении не создается никаких изменений в величине площади вне круга.

Теперь я произведу такой опыт. Я выдуваю пузырь и помещаю его на проволочном кольце. Затем я привешиваю к нему снизу маленькое кольцо и, чтобы лучше видеть, что случится, впускаю внутрь пузыря немного дыма. Я разрываю пленку внутри нижнего кольца, и вы видите, что дым выгоняется наружу, а подвешенное кольцо поднимается. И то и другое указывает на упругие свойства пленки. А вот еще один опыт. Я выдул пузырь на конце широкой трубки; если

поднести открытый конец трубки к пламени свечи, то выходящий воздух сразу потушит пламя, что указывает на сходство мыльного пузыря с упругим растянутым мешком (рис 20). В действительности при этом опыте тушению свечи в значительной мере способствует углекислый газ из наших легких. Но можно достичь того же результата при помощи чистого воздуха. Вы видите теперь, что вследствие упругости оболочки мыльного пузыря воздух или другой газ внутри него находится под давлением и при первой возможности стремится выйти наружу.

Поставим теперь вопрос: внутри какого пузыря воздух сдавливается сильнее — внутри большого или маленького? Попробуем решить этот вопрос путем опыта и попытаемся объяснить результат. Вот две трубки, каждая с краном. Они соединены между собою третьей трубкой, посреди которой тоже имеется кран. Сначала я выдуваю один пузырь и запираю его при помощи крана (рис. 21), а затем другой, который, в свою очередь, запирается краном. Пузыри почти одинакового размера, но воздух не может переходить из одного в другой, потому что средний кран тоже закрыт. Если давление внутри большого пузыря больше, то, когда я открою средний кран, воздух должен будет переходить из большого пузыря в малый, пока они не сравняются по величине; наоборот, если давление больше в маленьком пузыре, он будет вдвухать воздух в большой, а сам будет уменьшаться, пока не исчезнет совершенно. Проверим эти соображения

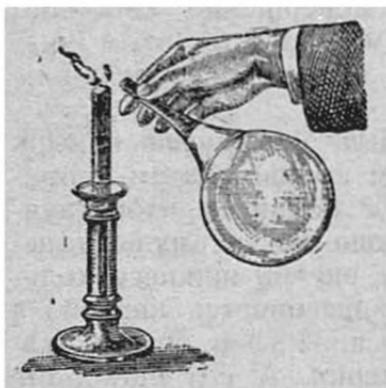


Рис. 20.

опытом. Вы видите сразу, что как только я открываю промежуточный кран, малый пузырь сжимается и вдвухает воздух в большой, показывая, таким образом, что давление внутри маленького пузыря больше, чем внутри большого. Направления, в которых движется воздух и изменяются пузыри, указаны на рисунке стрелками. Мне хотелось бы обратить на этот опыт

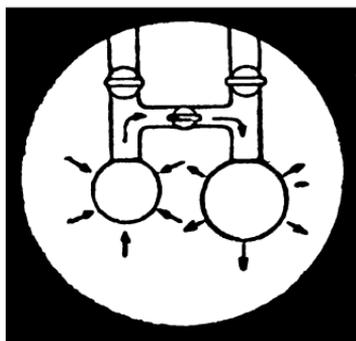


Рис. 21.

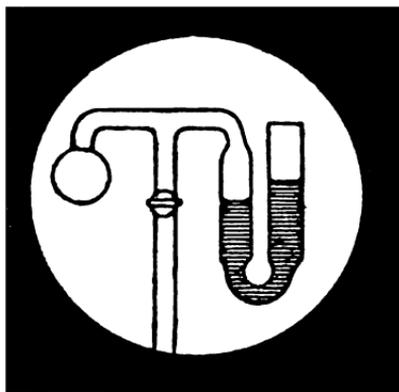


Рис. 22.

ваше особое внимание и просить запомнить его, потому что он является основой многого, о чем будет речь впоследствии. Чтобы запечатлеть его в вашей памяти, я хочу показать то же самое другим способом.

Вот здесь, перед фонарем, помещена трубка, изогнутая в виде дуги и наполовину наполненная водой. Левый конец этой трубки имеет продолжение, на котором можно выдуть пузырь (рис. 22). Вы можете теперь видеть, как изменяется давление, когда размеры пузыря возрастают, так как вода в дугообразной трубочке перемещается сильнее при большом давлении и слабее при малом. Вот теперь, когда на конце трубки находится очень маленький пузырь, давление, определяемое высотой столба воды на измерительной линейке, оказывается равным половине сантиметра. Когда пузырь увеличивается, мы видим, что давление падает, и вот, когда пузырь станет вдвое больше, давление окажется равным лишь половине прежней величины. Таким образом, оказывается верным, что чем меньше пузырь, тем больше давление. Так как перепонка всегда растянута с одной и той же силой, независимо от размеров пузыря, то ясно, что давление внутри пузыря может зависеть только от его кривизны. Когда речь идет об окружности, мы говорим, что чем она больше, тем меньше ее кривизна; отрезок маленькой окружности имеет, как мы гово-

рим, большую кривизну, тогда как отрезок большой окружности той же длины имеет лишь малую кривизну; если бы мы взяли отрезок огромной окружности, то не сумели бы отличить его от прямой линии и сказали бы, что у него нет кривизны вовсе. Совершенно так же обстоит дело с частью шаровой поверхности: чем больше шар, тем меньше его кривизна, и если бы шар имел величину нашей земли, т. е. около 13 000 километров в диаметре, мы не были бы в состоянии отличить небольшую часть поверхности такого шара от настоящей плоскости. Поверхность воды на земле представляет собой часть шаровой поверхности, хотя спокойная вода в небольшом озере или бассейне представляется совершенно плоской. Однако, можно убедиться, что в очень большом озере или море она оказывается искривленной. Мы видели, что в больших пузырях давление мало и кривизна мала, тогда как в маленьких пузырях давление велико и кривизна тоже большая. Давление и кривизна увеличиваются и уменьшаются одновременно. Теперь мы усвоили урок, данный нам опытом с двумя пузырями, из которых один был выдут при помощи другого.

Шар, или сфера,—не единственная форма, какую можно придать мыльному пузырю. Если поместить пузырь между двумя кольцами, его можно растягивать, пока он не примет вида круглой прямой трубки, так называемого цилиндра. Мы говорили о кривизне шара, или сферы; а какова будет кривизна цилиндра? Если смотреть сбоку на край деревянного цилиндра, поставленного на стол, то он будет представляться нам прямым, т. е. вовсе не имеющим кривизны; но если смотреть на цилиндр сверху, то конец его будет иметь вид круга; другими словами, он будет обладать определенной кривизной. Какова же в действительности кривизна поверхности цилиндра? Мы видели, что давление внутри пузыря зависит от его кривизны в том случае, когда пузырь имеет форму шара; но это верно для всяких пузырей, какой бы то ни было формы. Если нам удастся подобрать шар такого размера, чтобы воздух внутри него испытывал такое же давление, как и в цилиндрическом пузыре, тогда мы вправе будем сказать, что кривизна цилиндра равна кривизне

уравновешивающего его шара. Теперь на обоих концах короткой трубки я выдуваю по обыкновенному пузырю, притом нижнему пузырю придам при помощи другой трубки цилиндрическую форму, и буду вдвуханием или выпусканьем воздуха регулировать количество воздуха в нем, пока его стенки не станут совершенно прямыми. Вот теперь это удалось мне (рис. 23), и давление в обоих пузырях должно

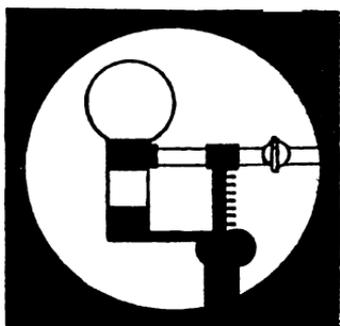


Рис. 23.

быть точно одинаковым, так как воздух может свободно переходить из одного в другой. Мы видим, что поперечник шара ровно в два раза больше поперечника цилиндра. Но этот шар обладает лишь половиной кривизны, которой обладал бы шар с половинным диаметром. Отсюда мы видим, что кривизна цилиндра, равная, как мы знаем, кривизне большого шара (так как они взаимно уравновешивают друг друга), составляет только половину кривизны шара равного диаметра, а потому давление внутри цилиндра равно только половине давления внутри шара с диаметром, равным диаметру цилиндра.

Теперь мне необходимо сделать еще шаг для разъяснения этого вопроса о кривизне. В тот момент, когда цилиндр и шар уравновешивают друг друга, я стану вдвухать воздух так, чтобы шар увеличился. Что произойдет с цилиндром? Цилиндр наш, как видите, очень короткий; раздуется он тоже или случится что-нибудь другое? Вот я вдвухаю воздух, и вы видите, что шар увеличился, причем давление внутри него уменьшилось; у цилиндра же появился пережат, это уже не цилиндр: его стенки вогнулись внутрь. По мере того как я вдвухаю воздух и увеличиваю шар, они вгибаются все больше внутрь, но не беспредельно. Если бы я мог раздуть верхний пузырь до огромных размеров, давление внутри него стало бы ничтожно малым. Попробуем теперь совершенно и сразу уничтожить давление, просто заставив верхний пузырь лопнуть и давая таким образом свобод-

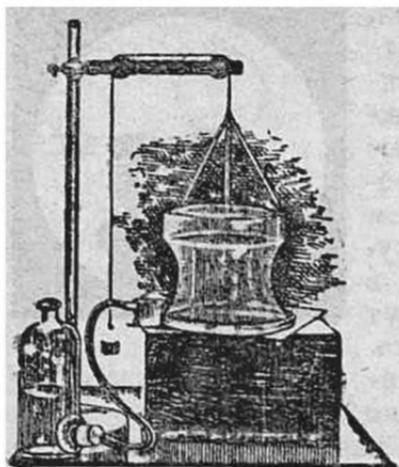


Рис. 24.

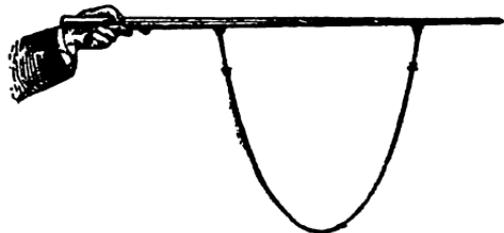


Рис. 25.

ный выход воздуха изнутри наружу. Повторим этот опыт в крупных размерах. Я беру два больших стеклянных кольца, между которыми образуется подобная же пленка, имеющая совершенно такую же форму с вогнутыми внутрь стенками (рис. 24). Но так как внутри нет вовсе давления, то тут не должно быть и никакой кривизны, если то, что я сказал выше, правильно. Присмотримся, однако, к мыльной пленке. Кто же решится утверждать, что она не имеет кривизны? А между тем мы твердо установили, что давление и кривизна неизменно связаны друг с другом. Повидимому, мы пришли теперь к нелепому заключению. Так как давление сведено к нулю, то, как мы знаем, у поверхности не должно быть кривизны, а между тем достаточно беглого взгляда, чтобы заметить, что наша поверхность обладает кривизной, придающей ей вид элегантной фигуры с талией. Чтобы разобраться в этом, рассмотрим гипсовую модель геометрического тела, обладающего таким же перехватом.

Присмотримся к этому телу внимательнее. Я беру картонный кружок точно такого же диаметра, как и перехват нашей модели. Затем я прикладываю его ребром к перехвату (рис. 25), и вы видите, что, хотя кружок и не заполняет всей кривизны, он плотно соприкасается с частью, прилегающей к перехвату. Да-

лее мы обратим внимание на то, что эта часть модели при рассматривании сбоку кажется вогнутой внутрь, но она же показалась бы нам выгнутой наружу, если бы мы могли посмотреть на эту часть модели сверху. Итак, если рассматривать отдельно перехват, мы видим, что он одновременно и в одинаковой степени вогнут внутрь и выгнут наружу, в зависимости от точки зрения, с какой мы его рассматриваем. Кривизна, направленная внутрь, должна уменьшать давление внутри, кривизна же, направленная наружу, должна увеличивать его, а так как они равны, то как раз уравновешивают одна другую, и тут совсем не будет никакого давления. Если бы мы могли таким же путем исследовать пузырь с перехватом, мы убедились бы, что это справедливо не только по отношению к перехвату, но и по отношению к каждой части пузыря. Когда мы имеем дело с какой-нибудь изогнутой поверхностью, то для определения ее кривизны в какой-либо точке надо измерить кривизны вдоль двух взаимно перпендикулярных линий. Всякая кривая поверхность, подобная нашей, у которой в каждой точке эти две кривизны противоположно направлены и равны, называется поверхностью без кривизны. Таким образом, то, что казалось нелепостью, теперь разъяснилось. Наша поверхность, единственная, за исключением плоскости, поверхность без кривизны, симметричная по отношению к оси, называется катеноидом, потому что линии ее похожи, как вы непосредственно видите, на цепь, укрепленную в двух точках, а «catena» по-латыни и значит «цепь». Я привешиваю цепь к двум крючкам на горизонтальной палке и освещаю ее сильным светом так, что ее вам теперь хорошо видно (рис. 26). Это та же самая форма, что и у боковой поверхности мыльного пузыря, образованного между двумя кольцами и открытого на концах доступу воздуха.



Может случиться, что кривизны, измеренные вдоль двух взаимно перпендикулярных

Рис. 26.

линий, не равны и противоположны, как у только что рассмотренного катеноида; тогда, если поверхность имеет натяжение, подобное поверхностному натяжению воды, давление окажется бóльшим на более вогнутой стороне, причем оно прямо пропорционально разности между двумя кривизнами. Эти соображения дают нам ключ к решению проблемы о точной форме капли воды (рис. 2) или спирта. Давление внутри определенного количества жидкости возрастает постепенно сверху вниз, подобно тому как в море давление возрастает по мере опускания вглубь. Форма капли такова, что на каком-нибудь уровне полная кривизна, определенная, как было указано выше, т. е. сумма или разность кривизн, измеренных в двух взаимно перпендикулярных направлениях (сумма, если их центры лежат по одну сторону поверхности, или разность, если по обеим сторонам), пропорциональна расстоянию от уровня воды или спирта. Вода — более тяжелая жидкость, а потому капли ее должны были бы быть сами по себе меньше, но, с другой стороны, ее поверхностное натяжение превосходит поверхностное натяжение спирта, так что в результате капли воды оказываются крупнее капель спирта.

Мы нашли, что давление внутри короткого цилиндра уменьшается, если у него начинает образовываться перехват, и, наоборот, увеличивается, когда стенки цилиндра выпячиваются. Попробуем теперь уравновесить два пузыря: один с перехватом, а другой с раздутыми стенками. Как только я открываю кран и даю возможность воздуху переходить из одного пузыря в другой, раздутый пузырь перегоняет воздух в пузырь с перехватом и оба они становятся прямыми. На рис. 27 направление движения воздуха, а также стенок пузырей, обозначено стрелками. Произведем теперь тот же самый опыт с двумя гораздо более длинными цилиндрами, у которых длина, примерно, в два или три раза больше диаметра. Вот они и готовы: один с раздутыми стенками, а другой с перехватом посередине. Я открываю кран и даю воздуху возможность переходить из одного в другой. Что же оказывается? Пузырь с перехватом сжимается и раздувает другой еще сильнее (рис. 28), пока, наконец, сам не

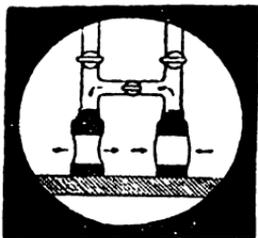


Рис. 27.

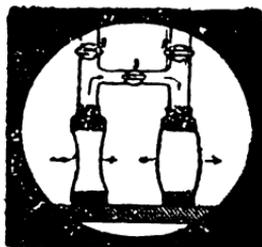


Рис. 28.

разделится пополам. Таким образом, он ведет себя прямо противоположно тому, как действовал короткий цилиндр. Если вы станете испытывать несколько цилиндров различной длины, вы убедитесь, что перемена эта происходит как раз у тех цилиндров, у которых длина ровно в полтора раза больше диаметра. Если теперь вы вообразите, что один из этих цилиндров соединяется концом с другим, вы увидите, что цилиндр, у которого длина в три раза превосходит диаметр, может существовать лишь мгновение; причина в том, что, как только один конец чуть-чуть сожмется, давление здесь возрастает и узкий конец начинает вдвухать воздух в широкий конец (рис. 29), пока стенки узкого конца не соприкоснутся. Точная длина самого длинного устойчивого цилиндра немногим больше трех его диаметров. Цилиндр становится неустойчивым как раз в тот момент, когда длина его становится равной окружности, а это почти в точности соответствует величине в $3\frac{1}{7}$ его диаметра.

Я постепенно раздвигаю эти кольца, поддерживая приток воздуха, и вы видите, что, как только длина трубки становится приблизительно в три раза больше ее диаметра, оказывается очень трудным поддерживать ее, и вот вдруг образуется перехват ближе к одному концу и трубка разрывается, образуя два отдельных неравных пузыря.

Мыльный пузырь обладает натяжением и всегда принимает такую форму, чтобы его поверхность стала возможно меньшей, поскольку это допускается условиями, а именно — содержащимся в нем воздухом и формой твердой опоры, которая поддерживает пузырь. Очевидно, что это дает нам возможность уста-

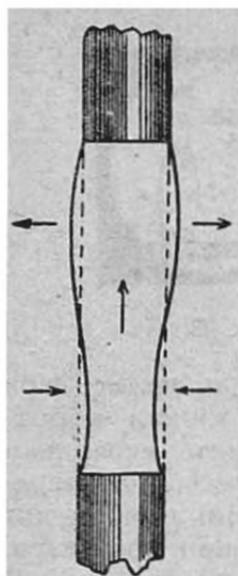


Рис. 29.

новить, увеличивает или уменьшает данное изменение формы общую поверхность. Остановимся, например, на только что рассмотренном цилиндре, опирающемся на два кольца и содержащем достаточно воздуха; если длина его меньше $3\frac{1}{7}$ диаметра, тогда сужение одного конца и расширение другого увеличивают общую поверхность. Это мы знаем потому, что мыльный пузырь такой формы может существовать. Пузырь длиной больше $3\frac{1}{7}$ диаметра не может существовать. Следовательно, движение, ведущее к образованию на одном конце перехвата и раздутия на другом, как бы мало оно ни было, ведет к уменьшению поверхности; пузырь уже не возвратится к прежнему положению, но это уменьшение поверхности будет идти все дальше, пока пузырь не разорвется, как мы уже видели. Как раз при критической длине в $3\frac{1}{7}$ диаметра небольшому такому движению соответствует крайне малое изменение поверхности. Пузырь или сопротивляется с очень небольшой силой, или способствует этому движению. Такие пузыри называются очень малоустойчивыми или просто неустойчивыми. Подобный пузырь может быть использован для изучения

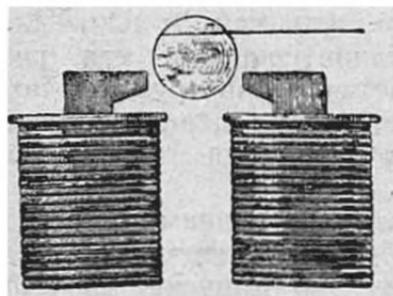


Рис. 30.

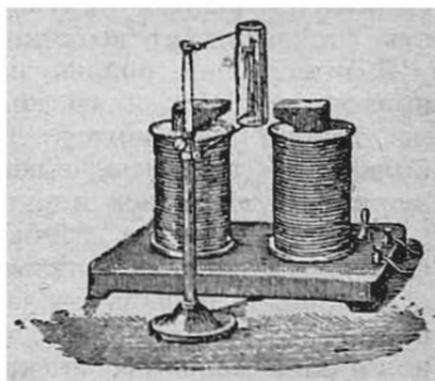


Рис. 31.

таких малых сил, действующих на находящийся внутри него газ, каких мы не подметили бы у пузыря более стойкой формы, например у обыкновенного шарообразного мыльного пузыря. Вот тут я выдуваю сферический пузырь с помощью чистого кислорода и помещаю этот пузырь между двумя полюсами электромагнита, т. е. куска мягкого железа, который превращается в

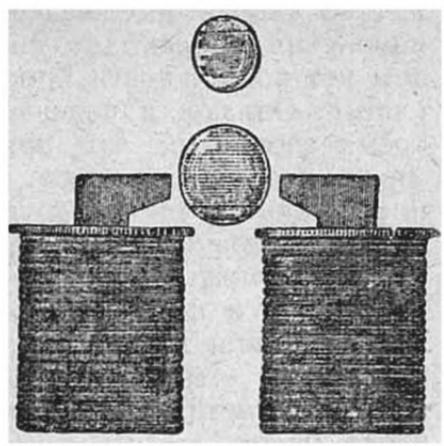


Рис. 32.

магнит только при пропускании по обвивающей его изолированной проволоке электрического тока (рис. 30). Пузырь и магнит можно видеть на экране, и вы слышите стук выключателя, замыкающего ток. Внутри пузыря должно происходить какое-то движение, потому что кислород слабо магнитен, однако, я сомневаюсь, чтобы кому-нибудь удалось подметить это движение. А теперь, пользуясь подставкой с двумя передвигающимися кольцами, я выдуваю другой пузырь, наполненный тем же самым газом, и вытягиваю его в цилиндр с длиной, очень близкой к критической (рис. 31). В тот момент, когда вы слышите стук выключателя, магнит действует на газ, придает ему силу преодолеть слабое сопротивление почти неустойчивого пузыря, и в мгновение, слишком короткое, чтобы процесс можно было проследить глазом, наш пузырь разрывается на два (рис. 32).

ЖИДКИЕ ЦИЛИНДРЫ И СТРУИ

Представим себе теперь внезапно образовавшийся цилиндр жидкости большой длины, который предоставлен самому себе; ясно, что он не в состоянии будет сохранить эту форму. Он должен распасться на мно-

жество капель. К сожалению, в падающей струе воды изменения происходят так быстро, что простым глазом нет возможности проследить движения отдельных капель. Однако, я надеюсь показать вам двумя или тремя способами, что при этом происходит. Вы помните, что мы научились получать большие капли одной жидкости внутри другой, и таким путем нам удавалось устранить действие силы тяжести. Большие капли изменяют свою форму гораздо медленнее, чем маленькие, и потому на них гораздо удобнее наблюдать, что при этом происходит. Вот в этом стеклянном ящике у меня вода, окрашенная в синий цвет. На ее поверхности плавает керосин. Мне пришлось для этого опыта сделать керосин более тяжелым, подмешав к нему дурно пахнущую и огнеопасную жидкость — сероуглерод.

Вода лишь едва-едва тяжелее этой смеси. Погрузим в воду трубку, дадим ей наполниться и затем, подняв ее, будем медленно, по каплям, выпускать воду в керосин. Образуются крупные капли размером в двухкопеечную монету, и, когда каждая из них достигнет своей предельной величины, у нее начинает образовываться вверху шейка, которая вытягивается падающей каплей в маленький цилиндр. Вы заметите, что жидкость шейки в свою очередь собирается в маленькую капельку, которая падает сейчас же вслед за большой. Весь процесс протекает достаточно медленно, и вы можете проследить его. Если я снова наполню трубку водой и быстро выну ее из жидкости, то вслед за трубкой вытягивается водяной цилиндр, который разбивается на шары, как вы легко можете видеть (рис. 33). Теперь мне хотелось бы показать вам, пользуясь готовым прибором, как внутри керосиновой смеси вы можете выдуть пузыри из воды, и некоторые из них, как вы увидите, будут содержать другие пузыри и капли из той или иной жидкости. Одна из таких пузырьевидных капель остановилась теперь в покое над более тяжелым слоем жидкости, что дает вам возможность рассмотреть ее наилучшим образом (рис. 34). Когда я быстро вынимаю трубку из ящика, внутри остается длинный цилиндрический пузырь воды, содержащий керосин; этот цилиндрический

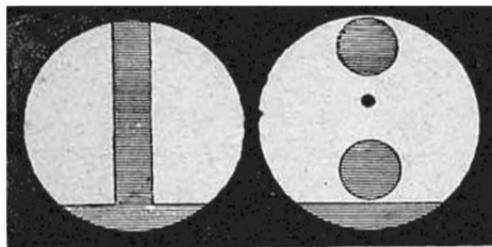


Рис. 33.

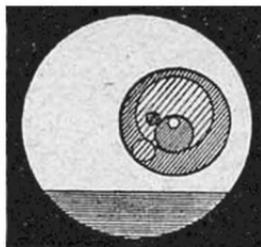


Рис. 34.

пузырь, как это было с водяным цилиндром, медленно разбивается на сферические гужири. Еще более пригодны для этих опытов ортотолуидин и вода. Иногда, случайно, помещая одну жидкость внутри другой, удается наблюдать красивейшие пузыри, какие только могут быть получены. Если сосуд с водой и ртутью поместить под сильно бьющую струю воды, то вода и воздух, загнанные внутрь, вызовут образование пузырей ртути, которые будут плавать по водной поверхности. Вот мне удалось получить эти пузыри в другом сосуде, где по временам в течение нескольких секунд вы видите сияющие шары чистого серебра, превосходной формы и полировки. Когда они лопаются, остается только маленький шарик ртути, однако, значительно более крупный, чем количество жидкости ст мыльного пузыря того же размера. Мне удавалось получать пузыри из ртути в 2 сантиметра диаметром. Ученый, по имени Мельсенс, впервые описавший это явление в 1845 году, нашел, что верхняя часть пузыря была так тонка, что просвечивала серовато-синим светом, чего мне не удалось наблюдать. Этот опыт не удастся, если его производить в свинцовой посуде или в раковине со свинцовым стоком. Нужно позаботиться о том, чтобы сосуд для опыта помещался внутри другого большого сосуда, в котором можно собрать вытекающую ртуть.

Показав, что очень большой жидкий цилиндр разбивается на капли, я перейду теперь к другой крайности и возьму для примера чрезвычайно маленький цилиндр. Вот перед вами фотографический снимок паука в его геометрически правильных тенетах (рис. 35). Если бы я располагал временем, я охотно

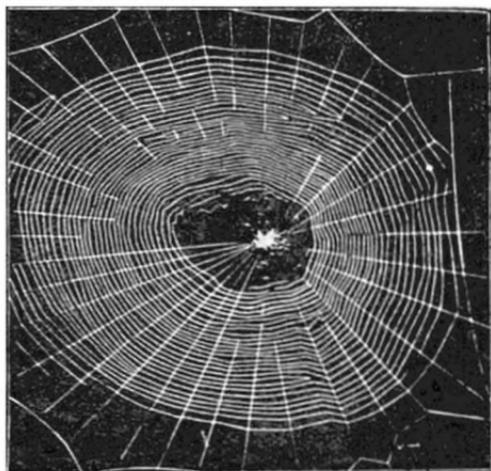


Рис. 35.

рассказал бы вам, каким образом паук создает свою удивительную ткань, и вообще многое об этих удивительных существах, однако, я ограничусь только тем, что имеет непосредственное отношение к предмету нашей беседы. Вы видите здесь два рода нитей паутины: одни крепки и гладки и расходятся радиусами, другие нити идут кругами, очень упруги и покрыты мел-

кими капельками клейкой жидкости. На хорошей паутине около четверти миллиона таких клейких бисеринок, которые ловят мух пауку на обед. Паук изготавливает свою паутину в течение часа и обыкновенно каждый день делает новую. Он не мог бы ходить по паутине и насаживать эти капельки, даже если бы знал, как это сделать, просто потому, что у него не хватило бы времени. Здесь приходит на помощь уже известное нам свойство жидких цилиндров — разбиваться на капельки. Паук вытягивает нить паутины и вместе с тем смачивает эту нить клейкой жидкостью; частицы жидкости первоначально в самом деле имеют форму цилиндра, но такой цилиндр не может сохраняться долго и разрывается на бисеринки, что великолепно видно на фотографии, снятой с помощью микроскопа (рис. 36).

Вы видите то большие, то маленькие капли, а иногда даже замечаете между ними совсем маленькие капельки. Чтобы точно установить, какой величины в действительности эти похожие на бисер капельки, можно поместить вдоль нити линейку с делениями в одну тысячную дюйма¹ и сфотографировать и то и другое одновременно. Убедить вас в правильности

¹ Тысячная доля дюйма почти точно равна $\frac{1}{40}$ миллиметра-



Рис. 36.

этих соображений я могу, показав вам паутинку, которую я изготовил сам, смазав кварцевую нить соломинкой, предварительно смоченной касторовым маслом. Тут мы тоже видим то большие, то маленькие бисеринки такой же совершенной формы, как и на паутине. И в самом деле, открыть разницу между моей искусственной и настоящей паутиной простым глазом невозможно. Вы можете сказать, что большой цилиндр воды в масле и микроскопический цилиндр, располагающийся вокруг нити паутины, — это не то же самое, что обыкновенная струя воды, и вы пожелаете убедиться, будет ли она вести себя так, как было мною описано. Следующий фотографический снимок (рис. 37), сделанный при свете мгновенной электрической искры и увеличенный в три с четвертью раза, показывает

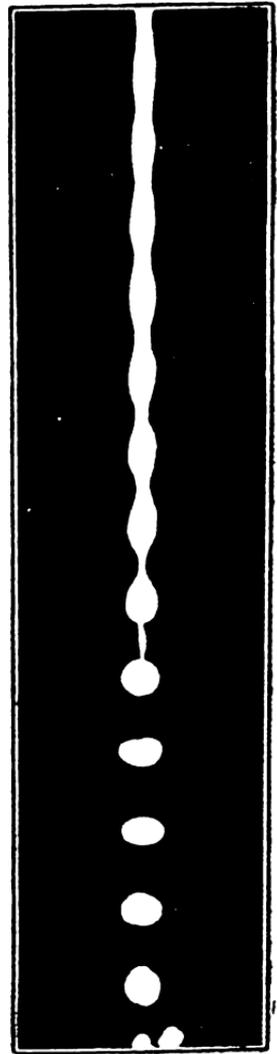


Рис. 37.

нам такой столбик воды в виде падающей водяной струи. Сначала струя представляет собою цилиндр, который по мере падения вниз начинает образовывать перетяжки и утолщения и, наконец, отделять капли, которые вы хорошо можете рассмотреть. Капли эти вибрируют, то удлиняясь, то расширяясь, и не может быть никакого сомнения, что сверкающая часть струи, хотя и кажется непрерывной, в действительности состоит из отдельных капель, которые пролетают так

быстро, что наш глаз не в состоянии уследить за ними. (Должен добавить, что по причине, которая выяснится впоследствии, в момент фотографирования струи я произвел громкий звук, свистя в этот ключ.)

В струе воды диаметром в один миллиметр образующиеся на струе шейки, как бы они ни были ничтожны, в течение каждой сороковой доли секунды углубляются на величину, в тысячу раз большую. Таким образом нетрудно понять, что такая струя воды распадается на капли, прежде чем она упадет на несколько сантиметров. Свободные водяные капли пульсируют со скоростью, которую можно установить следующим образом. Капля в 50 миллиметров диаметром совершает полное колебание в течение одной секунды. Если диаметр капли уменьшить до одной четверти прежней величины, время (период) одного колебания сократится до одной восьмой, или, если диаметр сократится до одной сотой, время одного колебания уменьшится до одной тысячной, и т. д.¹ То же самое отношение между диаметром и временем разрывания существует и у цилиндрического столбика воды. Мы сразу можем видеть, как быстро будут пульсировать капли воды таких же размеров, как капельки жидкости на нитях паутины, если изменить их форму и затем внезапно предоставить самим себе. Если предположить, что диаметр капельки достигает одной тридцать второй доли миллиметра, а в действительности он даже меньше, то он составит одну тысяча шестисотую часть диаметра капли в 50 миллиметров, которая совершает одно колебание в течение секунды. Она должна поэтому пульсировать в шестьдесят четыре тысячи раз быстрее, или шестьдесят четыре тысячи раз в секунду.

Водяные капельки малых размеров с диаметром, меньшим одной сто двадцатой доли миллиметра, должны пульсировать полмиллиона раз в секунду под одним только влиянием слабой упругой оболочки воды. Мы видим таким образом, как могущественно

¹ Время колебания определяется выражением $\frac{1}{125} \times r \frac{3}{2}$, где r — диаметр капли, измеренной в миллиметрах.

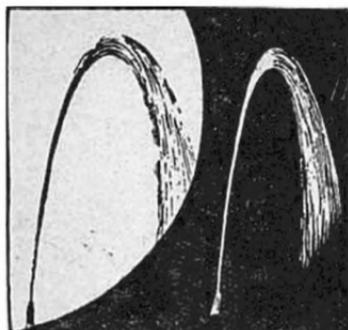


Рис. 38.



Рис. 39.

влияние слабой упругой перепонки воды на водяные капли, если они достаточно малы.

Теперь я устрою маленький фонтан и дам возможность падающей струе ударять в подложенный внизу лист бумаги. Вы видите сейчас и самый фонтан и его тень на экране. Вы замечаете, что вода выходит из трубочки в виде гладкого столбика, который начинает в этом месте сверкать, и вот отдельные капли барабаниют на большом пространстве по бумаге (рис. 38). Почему же капли барабаниют? Вся вода вырывается в виде струи в одном и том же направлении, и все же на небольшом расстоянии отдельные капли уже перестают следовать по одному и тому же пути. Но теперь, вместо того чтобы объяснить это, а затем показывать опыты для проверки этого объяснения, я хочу отказаться от обычного порядка и показать сначала два-три опыта, которые — я думаю, вы согласитесь, — покажутся чуть ли не чудесными.

Вы видите сейчас, что струя воды разбрасывается по всем направлениям, и слышите, как капли барабаниют по бумаге. Но вот я вынимаю из кармана палочку сургуча, и вдруг все переменяется, хотя я нахожусь на некотором расстоянии от фонтана и ни к чему не прикасаюсь. Вода перестает разбрасываться; она льется непрерывной струей (рис. 39) и падает на бумагу, производя громкий грохочущий звук, который напоминает шум грозового ливня. Я подхожу немного ближе к фонтану, и вода снова разбрасывается, хотя теперь совершенно иным способом. Падающие капли теперь значительно больше прежних. Как только я

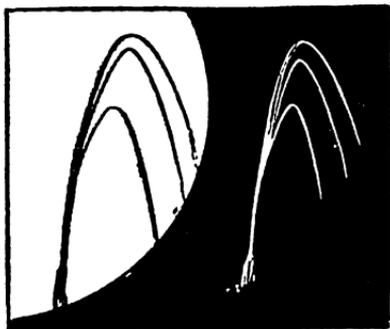


Рис. 40.

прячу сургуч, струя воды приобретает прежний вид, но стоит вынуть сургуч — и вода опять льется в виде сплошной струи.

Теперь вместо сургуча я воспользуюсь коптящим пламенем, которое легко получить, если опустить кусочек ваты на палочке в бензол, а затем зажечь ее. Пока я держу пламя вдали от фонтана, не замечается ни-

каких перемен, но в тот момент, когда я подношу пламя близко, так, чтобы вода проходила через него, струя воды перестает разбрасываться; вода стремится в виде сплошной линии и падает темной грязной струей на бумагу. Самого ничтожного количества масла, впущенного в струю воды при помощи тоненькой, как волос, трубочки, достаточно, чтобы получить тот же самый результат.

Теперь на другом конце стола я заставляю звучать камертон. Вид фонтана не изменился. Но вот я прикасаюсь к подставке камертона длинной палочкой, другой конец которой прикасается к носику прибора, откуда бьет фонтан. Снова вода собирается в сплошную струю, и бумага, на которую падает вода, гудит в той же ноте, как и камертон. Если я изменяю скорость струи, вы видите, явление снова меняется, но эта струя никогда не станет похожей на струю, не подвергающуюся действию музыкального звука. Порою струя разбивается на две или на три, порою на еще большее число отдельных струй, как будто бы они выходят из нескольких трубок различного размера и притом в разных направлениях (рис. 40). Действие различных нот может быть легко обнаружено, если кто-нибудь пропоет их перед куском дерева, поддерживающим трубочку, через которую бьет фонтан. Я произведу шумы различной высоты, которые для этой цели, пожалуй, лучше музыкальных звуков, и вы видите, что с каждым новым звуком фонтан приобретает иной вид. Многих, вероятно, удивит, каким обра-

зом такие ничтожные причины — кусок сургуча, коптящее пламя, масло или более или менее музыкальный шум — могут давать такой загадочный результат, однако, объяснение этого явления не так трудно, как можно было бы ожидать.

Вспомним, что я говорил относительно столбика жидкости цилиндрической формы. Если длина его немного больше чем в три раза превосходит диаметр, он не в состоянии сохранять свою форму; если сделать так, чтобы длина его стала значительно превышать его диаметр, он распадется на ряды капель. Теперь, если каким-либо путем образуется ряд шеек на цилиндре с промежутками, меньшими, чем три диаметра, то некоторые из этих перетяжек исчезнут, потому что часть цилиндра, длиной меньше трех диаметров, устойчива. Если перетяжки получатся на расстояниях, приблизительно равных трем диаметрам (случай неустойчивой формы), то шейки с течением времени будут перетягиваться все сильнее, и, наконец, струя разорвется, образуя отдельные капельки. Если же шейки возникнут на расстояниях, удаленных друг от друга более чем в три диаметра, тогда цилиндр также разорвется вследствие сужения этих шеек. Легче всего он разорвется на капли тогда, когда шейки окажутся одна от другой как раз на расстоянии четырех с половиной диаметров. Другими словами, если фонтан будет бить из трубочки, находящейся в полном покое, струя легче всего будет разбиваться на капли на расстоянии в четыре с половиной диаметра.

Эта струя разобьется на большое число малых капель или на малое число больших капель в зависимости от того, где будут образовываться едва заметные перетяжки при легких нарушениях равновесия струи. Когда мы заставляем фонтан бить из трубочки, укрепленной насколько возможно неподвижно, то достаточно случайных сотрясений всевозможного рода, чтобы они вызвали на вытекающем цилиндре легкие сужения и расширения на различных расстояниях друг от друга. Тогда струя разбивается на капли различных размеров, отделенные одна от другой неодинаковыми промежутками. Перед разделением этих капель образуются, как вы видели, перетяжки, причем упругость

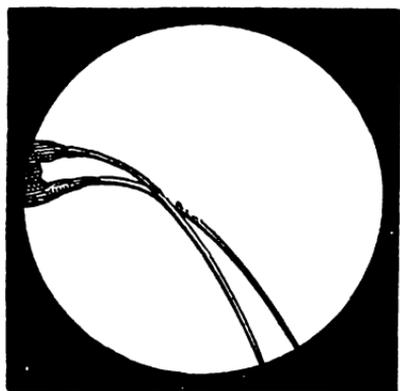


Рис. 41.



Рис. 42.

поверхностной перепонки перехвата тянет капли навстречу друг другу; так как в воздухе они могут свободно двигаться, то задняя капля должна стремиться вперед, а та, что находится впереди, отставать; таким образом, эти капли, если только они не будут совершенно сходны между собой по размерам и разделяющим их промежуткам, начнут вскоре сталкиваться одна с другой. Естественно предположить, что они, сталкиваясь одна с другой, будут сливаться вместе, но я могу вам сейчас показать, что этого не происходит: они отскакивают одна от другой благодаря упругости поверхностного слоя. Очевидно, когда образуется целый ряд капель различной величины и с неодинаковыми промежутками между ними и эти капли часто сталкиваются между собой, такие капли будут разлетаться в разные стороны и падать на широкую площадь подложенной внизу бумаги, как вы только что видели.

Какое же действие оказывают на струю палочка сургуча, коптящее пламя или масло? Каким образом музыкальный звук может остановить разбрасывание капель? Возьмем сначала палочку сургуча. Кусок сургуча, потертый о суконную материю вашего костюма, электризуется и начинает притягивать кусочки бумаги. Наэлектризованный сургуч, действуя на водяные капли, помогает их взаимному притяжению, правда, очень слабому, но все же достаточному, что-

бы помочь им преодолеть сопротивление разделяющего их слоя воздуха и слиться вместе. Вот я поместил перед фонарем две струи чистой воды, бьющие из разных сосудов, и вы видите, что они отскакивают одна от другой (рис. 41). Чтобы показать, что это в самом деле так, я окрасил воду в обоих сосудах в разные цвета. Теперь я отхожу на другой конец комнаты и вынимаю из кармана сургуч; в одно мгновение вид струй меняется: они сливаются вместе (рис. 42). Это можно повторять сколько угодно раз и всегда с одинаковым успехом. Две взаимно отталкивающиеся струи дают нам в руки один из самых тонких способов открывать присутствие электричества. Теперь вам станет понятным первый мой опыт. Отдельные капли, отскакивающие одна от другой и рассыпающиеся в разных направлениях, теряют эту способность, когда к ним приближается наэлектризованный кусок сургуча. Они начинают сливаться, и вместо большого числа маленьких капелек, падающих в различных направлениях на бумагу, струя течет в виде одной линии с крупными каплями, подобными каплям грозового ливня, падающими одна за другой в одну и ту же точку. Не подлежит сомнению, что именно по этой причине капли дождя во время грозы отличаются такой величиной.

Отскакивающие друг от друга водяные струи так чувствительны, что ими можно воспользоваться в качестве приемника сигналов беспроволочного телеграфа, если взять проводящую электричество разведенную серную кислоту; воспринимающая цепь прерывается воздушным промежутком между струями. Я приспособил маленький приемник таким образом, что, когда в конец рычажка ударяют слившиеся струи, другой конец приходит в соприкосновение с одной из отдельных струй. Это немедленно приводит к их разделению, и наш прибор снова готов к принятию сигнала. Стоит отметить интересное явление, которое легко наблюдать, когда прибор установлен в большом зале, на другом конце которого помещен вибратор для получения искр. Колебания приемника, как видно на экране, предупреждают звук искры: дело тут в том, что действие на струи получается почти одно-

временно с возникновением искры, звук же доходит сюда примерно на одну десятую секунды позже.

Коптящее пламя тоже заставляет струю течь в виде одной линии. Причина, вероятно, в том, что частицы копоти пробивают воздушную преграду подобно тому, как пылинки воздуха способствуют слиянию струй, когда они подвергаются действию электричества. Такое же действие оказывает сгущающееся на поверхности воды маслянистое вещество, потому что масло само по себе действует совершенно так же, как и пламя; но действие масла в этом случае, как и его успокаивающее действие на волнующееся море, может быть понято далеко не так легко.

Когда я приближаю сургуч, капли начинают сливаться; но затем они наэлектризовываются так сильно, что отталкивают друг друга, как это происходит вообще с двумя одинаково наэлектризованными телами, и таким образом снова под действием электричества возникает разбрасывание капель.

Вероятно, вы уже понимаете теперь, почему звучащий камертон заставляет капли следовать по одной линии, однако, я все же остановлюсь на этом. Музыкальный звук, как хорошо известно, вызывается быстрыми колебаниями ножек камертона; чем быстрее колебания, тем выше получающийся тон. Возьмем зубчатое колесо, которое можно вращать с очень большой быстротой. Когда оно вращается медленно, вы слышите, как отдельные зубья ударяют о картон, который я держу в другой руке. Я сообщаю колесу более быстрое движение, и картон начинает издавать низкий тон. По мере того как я привожу колесо во все более быстрое вращение, высота тона все возрастает, и, если бы я мог сообщить колесу достаточную скорость, звук получился бы настолько высоким, что вы перестали бы его слышать. Камертон колеблется с определенной частотой и потому дает определенную ноту. Наш камертон совершает сейчас 128 колебаний в секунду. Поэтому в нашем опыте и кончик трубки, из которого бьет фонтан, тоже колеблется, но почти нечувствительно, 128 раз в секунду, и вылетающая струя воды получает в секунду 128 едва заметных перехватов. Будут ли эти перехваты находиться друг от друга на

расстоянии четырех с половиной диаметров цилиндра, это будет зависеть от диаметра струи и от скорости вытекания жидкости. Когда струя большая, то вода для этого должна вытекать быстро или под большим давлением; при маленькой струйке достаточно и меньшей скорости. Если случится, что образовавшиеся таким образом перехваты будут где-нибудь отделены промежутками, при-



Рис. 43.

близительно равными четырем с половиной диаметрам струи, они будут усиливаться с довольно большой скоростью, хотя, если сделать очень точный рисунок струи, вы вначале не откроете здесь ни малейшего сокращения диаметра. Водяной столб разобьется на одинаковые капли, причем каждая будет подобна той, которая расположена позади, и той, которая летит впереди, тогда как, если бы столб воды разбился под влиянием случайных сотрясений, все капли были бы различны. А раз все капли во всех отношениях сходны, они неизбежно будут следовать все в одном направлении, образуя одну непрерывную на вид струю. Когда перехваты образовались на расстоянии около четырех с половиной диаметров, разрывание струи происходит с наибольшей легкостью; но она будет, как я сказал, разбиваться и под влиянием целого ряда других звуков, которые могут вызвать перехваты на расстояниях, превышающих три диаметра. Если одновременно звучат две ноты, тогда очень часто каждая производит свой эффект, и в результате будут возникать капли различной величины, что в свою очередь приведет к образованию двойной струи. Таким образом можно получить три, четыре и даже большее число отдельных струй.

Я могу теперь показать вам фотографические снимки нескольких таких музыкальных фонтанов, сделанные при свете мгновенной вспышки электрической искры.

Вы видите, что капли различных размеров описывают различные пути (рис. 43). На одном фотографическом снимке вы видите восемь различных струек, бьющих из одной общей струи, но следующих совершенно различными путями, причем каждая из них представляет правильный ряд одинаковых капель. На этих же фотографических снимках вы можете также видеть столкновение капель, сопровождающееся их сплющиванием в момент удара, подобным сплющиванию двух резиновых мячей. На фотографическом снимке, спроектированном теперь на экране, видно, как происходит столкновение капель в месте, отмеченном на рисунке крестиком. Верхняя и расположенная впереди капля получает толчок вперед, другая же замедляется в своем движении, а потому обе капли приобретают различные скорости в слегка различных направлениях.

Вот почему потом они и следуют разными путями. Маленькие капельки, без сомнения, подверглись подобному же воздействию, но часть фонтана, где это произошло, оказалась вне фотографической пластинки, и потому это явление осталось неотмеченным. Под влиянием музыкального звука от основной струи фонтана отделяются очень маленькие капельки, о которых я уже много говорил, и описывают свои собственные маленькие кривые, совершенно отличные от кривой главной струи. Конечно, они попадают на боковые пути после одного или двух столкновений с большими правильными каплями. Вы легко можете увидеть, что они действительно образуются под тем местом, где появляются впервые, если поднесете к струе у самого ее начала кусок наэлектризованного сургуча и затем станете постепенно поднимать его. Когда сургуч окажется против того места, где в действительности образуются маленькие капельки, он будет оказывать на них более могущественное действие, чем на большие капли, и будет вытягивать их оттуда, где за мгновение до того, казалось, их вовсе не существует. Тогда они начинают описывать вокруг сургуча правильные маленькие орбиты, подобно планетам, описывающим свои пути вокруг солнца; но в этом случае вследствие сопротивления воздуха орбиты превращаются в спирали,

и маленькие капельки после нескольких обращений падают в конце концов на палочку сургуча, совершенно так же, как после многих и многих обращений упали бы на солнце планеты, если бы их движение в пространстве задерживалось сопротивлением какой-либо среды.

Чтобы покончить с музыкальной струей, добавим, что вы можете сами наблюдать все эти капли в их различных положениях в настоящем фонтане. Если бы я произвел мощную электрическую искру, то некоторые из вас, вероятно, увидели бы на мгновение всю картину; однако, большинство, я думаю, не увидело бы вообще ничего. Поэтому я поступлю иначе. Вместо одной искры я произведу целый ряд искр с таким расчетом, чтобы за промежутки времени между искрами капли успели переместиться на пространства, их разделяющие, и каждая капля в момент вспыхивания света успела занять место своей предшественницы. При вспыхивании ряда искр все капли будут занимать одни и те же положения и будут казаться застывшими неподвижно в воздухе, тогда как в действительности они движутся и притом довольно быстро. Если же промежутки между отдельными искрами будут иными, тогда перед нами окажется любопытное явление. Предположим, например, что сначала вспышки света следуют одна за другой слишком быстро. Тогда каждая капля не успеет попасть на надлежащее место, и, таким образом, при второй вспышке света мы увидим все капли в местах, находящихся несколько позади прежнего расположения капель. При третьей вспышке мы увидим, что они еще больше отстали от своего первоначального положения, и т. д., а потому нам будет казаться, что капли медленно перемещаются назад. Наоборот, если вспышки света будут следовать одна за другой недостаточно быстро, тогда за промежутки времени между вспышками капли будут успевать перемещаться несколько дальше своих первоначальных положений, и нам будет казаться, что они медленно передвигаются вперед.

А теперь приступим к опыту. Вот тут у нас электрический фонарь, посылающий на экран сильный пучок света. При помощи чечевицы я собираю пучок света в фокусе, а затем пропускаю его через маленькое от-

верстие в куске картона. Свет расходится широким конусом и падает на экран. Фонтан воды помещается между картоном и экраном, и таким образом на экран отбрасывается довольно явственная тень. Теперь я помещаю непосредственно позади куска картона маленький электродвигатель, с помощью которого можно привести в очень быстрое вращение диск картона с шестью отверстиями, расположенными по самому его краю. Отверстия диска приходятся по очереди против единственного отверстия в неподвижном куске картона, и таким образом при каждом полном обороте диска у нас получится шесть вспышек света. Когда диск будет обращаться $21\frac{1}{3}$ раза в секунду, тогда вспышки света будут следовать одна за другой с надлежащей частотой. Я пускаю мотор и через несколько секунд получаю надлежащую скорость. Убедиться в этом я могу, продувая воздух через отверстия: получающийся при этом музыкальный звук будет большей высоты, чем у камертона, если скорость слишком велика, меньшей высоты, чем у камертона, если скорость слишком мала, и совершенно такой же высоты, как у камертона, когда скорость как раз такая, какая нам нужна.

Чтобы сделать еще более заметным момент, когда получится надлежащая скорость, я поместил между фонарем и экраном еще и камертон; вы видите освещенными его и тень его на экране. Струя воды еще не начала бить, однако, я прошу обратить внимание на камертон. Я останавливаю двигатель, освещение из прерывистого сделалось непрерывным. Вы видите, что камертон колеблется, потому что концы его ножек, где движение, естественно, должно быть наиболее быстрым, мы видим не отчетливо. Теперь мотор пущен в ход, и почти сразу вид камертона меняется. Он теперь похож на кусок резины, медленно раскрывающийся и складывающийся, а вот он кажется совершенно неподвижным, однако, производимый им звук показывает, что он никоим образом не находится в покое. Ножки камертона колеблются, но свет падает на них через правильные промежутки времени, соответствующие периоду их колебаний, а потому, как в разобранным случае водяных капель, ножки камертона кажутся нам совершенно неподвижными. Теперь скорость слегка из-

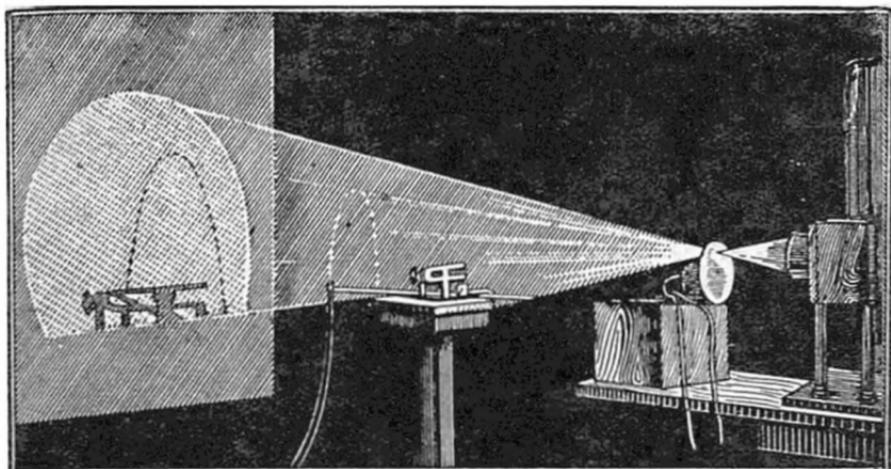


Рис. 44.

менилась, и, как я уже объяснил, каждая новая вспышка света возникает или слишком рано, или слишком поздно и показывает нам ножки камертона в положениях, несколько впереди или позади тех, в которых мы видели их при предшествующей вспышке. Вы видите таким образом, что ножки камертона медленно совершают свои эволюции, хотя в действительности они колеблются вперед и назад 128 раз в секунду. При взгляде на камертон или его тень вы в состоянии установить, совпадают ли промежутки между вспышками света с периодом колебаний камертона, а следовательно и водяных капель.

Теперь фонтан приведен в действие, и вы видите, что все отдельные капли кажутся неподвижными, подобно жемчужинам или серебряному бисеру, нанизанному на невидимую нить (рис. 44). Если заставить диск вращаться хотя бы чуть-чуть медленнее, тогда кажется, что все капли медленно передвигаются вперед, и — что красивее всего — можно наблюдать, как постепенно отрывается каждая капля, причем образующийся при этом перехват превращается в маленькую капельку. Когда главная капля освободится, она начинает медленно пульсировать, становясь то продолговатой, то плоской, или же вращаться по мере передвижения по

своему пути. Когда случится, что образуется двойная или многократная струя, тогда вы можете наблюдать, как маленькие капельки движутся одна навстречу другой, сдавливают одна другую и потом снова разлетаются в разные стороны. Теперь диск вращается несколько быстрее, и кажется, что капли медленно движутся назад, как будто вода поднимается из чашки на полу, спокойно проходит над моей головой обратно в трубку, из которой бьет фонтан, и поступает обратно в сосуд с водой. В действительности такого явления, как вы хорошо знаете, не происходит, в чем вы можете убедиться, если я просто помещу палец между двумя из этих капель. Расплескивание воды по всем направлениям показывает, что она движется далеко не так спокойно, как кажется. Еще одно необходимо добавить в связи с этим опытом. Каждый раз, когда вспыхивающий свет выигрывает или теряет одну полную вспышку по сравнению с колебаниями камертона, нам кажется, что камертон совершает одно полное колебание, и водяные капли кажутся переместившимися назад или вперед на одно место.

ВОДЯНОЙ МИКРОФОН

Теперь я перейду к одному из самых красивых, какие только можно вообразить, применений этих музыкальных струй для практических целей. То, что я теперь предполагаю показать, представляет небольшое из большого числа опытов Чичестера Белля, двоюродного брата Грэхема Белля, изобретателя телефона.

Сначала я беру очень маленькую струю воды, вытекающую из трубочки под большим давлением, что вы можете видеть, когда я направляю струю в потолок: вода поднимается на два с лишним метра. Когда я заставлю эту струю воды ударять в резиновую перепонку, натянутую на конец трубки толщиной в мой мизинец, тогда перепонка будет вдавливаться водой, и тем больше, чем сильнее струя. Теперь, когда я держу отверстие, из которого бьет струя, у самой перепонки, гладкий столбик жидкости надавливает на нее,

и она остается в покое; но если я стану постепенно удалять отверстие от перепонки, тогда некоторые перехваты, которые могли образоваться на столбике воды и число которых возрастает по мере передвижения, обнаруживают свое существование вполне очевидным образом. Когда в перепонку ударяет утолщенная часть столбика, перепонка подвергается несколько большему нажиму, чем обыкновенно, а когда следует суженная часть, давление ослабляется. Другими словами, очень слабое колебание, сообщенное струе, будет усиливаться по мере роста перехватов, и резиновая перепонка будет воспроизводить эти колебания, но в увеличенном масштабе. Теперь, если вы вспомните, что звук обуславливается колебаниями какого-либо тела, вы поймете, что наша струя представляет собой прибор для усиления звука. Чтобы убедить вас в справедливости сказанного, я направляю струю на перепонку, и вы сначала не слышите ничего. Но вот я приставляю к трубочке, из которой бьет струя воды, кусок дерева (рис. 45). Теперь, если струя вообще стремится разбиться при одной частоте колебаний легче, чем при другой, или если кусок дерева или перепонка легче колеблются при какой-нибудь определенной частоте, тогда первые же колебания, соответствующие этой частоте, передадутся куску дерева, который сообщит их трубке, а та в свою очередь столбику воды и перепонке, где они будут усилены. Результат получится тот, что струя немедленно начнет петь собственную мелодию, воспроизводя громкий тон.

Теперь я удаляю кусок дерева и прикладываю к трубочке обыкновенные карманные часы. Сотрясения корпуса при постукивании маятника так ничтожны, что вы не в состоянии обнаружить их. Но эти сотрясения, передаваясь трубочке, обуславливают образование перехватов на струе воды, которые усиливаются по мере ее движения, и в результате получается такое громкое тиканье, что его можно слышать во всех углах этой большой комнаты (рис. 46). Теперь я хотел бы показать вам, как усиливаются колебания при описанном только что явлении. Я опять подношу трубочку, из которой бьет вода, вплотную к резиновой перепонке, и вы опять не слышите ничего. По мере того как я по-



Рис. 45.

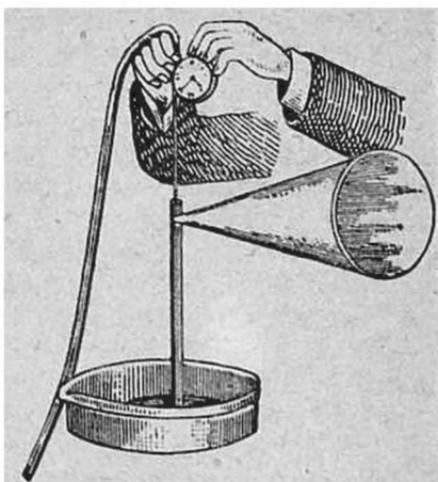


Рис. 46.

степенно удаляю трубочку, слышится слабый звук который становится все громче и громче, пока, наконец, он не начинает походить больше на стук молота о наковальню, чем на тиканье карманных часов.

Теперь я заменю эти часы другими, так называемыми часами с репетицией. Если нажать кнопку, они начинают бить сначала часы, затем четверти и, наконец минуты. Я надеюсь, что водяная струя даст вам всевозможность услышать, который теперь час. Слушайте! Раз, два, три, четыре... раз, два... раз, два, три, четыре, пять, шесть. Тридцать шесть минут пятого. Вы замечаете, что струя воды не только дала вам возможность слышать удары, но и добросовестно воспроизводила музыкальные ноты, так что вы в состоянии отличить одну ноту от другой.

Подобным же образом я могу заставить фонтан исполнить некоторую мелодию, просто приставив к трубке длинную палку, другой конец которой упирается в музыкальный ящик. Как вы видите, прибор находится в другом ящике, завернутом в толстую двойную войлочную оболочку и тщательно закрытом, так что вы едва ли можете слышать что-либо; но в тот момент, когда к трубке приставляется палка и вода направляется на резиновую перепонку, звуки музыкального ящика раздаются громко и слышны, я надеюсь

во всех углах этой комнаты. Обыкновенно, описывая фонтан, говорят, что он играет; теперь мы видим, что фонтан может играть даже музыкальную пьесу. Но тут есть одна занятная особенность. При известной частоте колебаний струя разбивается легче, чем при какой-либо иной, или, другими словами, на некоторые звуки она отвечает как бы охотнее, чем на другие. Вы слышите, что, когда музыкальный ящик начинает играть, некоторые ноты особенно забавно подчеркиваются, напоминая тот же самый эффект, который получается, если на струны рояля положить монету.

МЫЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ НА ПРОВОЛОЧНЫХ РАМКАХ

Возвращаясь теперь к мыльным пузырям, вспомним, что, как нами было установлено, катеноид и плоскость являются единственными поверхностями вращения, у которых нет кривизны и которые поэтому и в том случае, когда они образованы упругими перепонками, не производят давления. Существует множество других поверхностей, которые кажутся кривыми во всех направлениях и все же не имеют кривизны, а потому и не производят давления; но это не будут тела вращения, то есть их нельзя получить простым вращением некоторой кривой линии вокруг оси. Некоторое количество таких тел можно получить при помощи проволочных рамок различной формы, погружая их в мыльную воду. Вынимая рамки из воды, мы увидим удивительное разнообразие поверхностей без кривизны. Одна из таких поверхностей известна под названием винтовой поверхности. Чтобы получить ее, нужно лишь взять кусок проволоки, закрутить ее несколько раз в открытый завиток (называемый обыкновенно спиралью) и загнуть оба конца таким образом, чтобы они встретили другую, прямую проволоку, представляющую ось этой спирали. Винтовая поверхность, полученная погружением в мыльную воду проволочного прибора, стоит того, чтобы на нее посмотреть (рис. 47). С помощью рисунка невозможно дать представление о дивном совершенстве ее формы, но, к счастью, этот опыт отно-

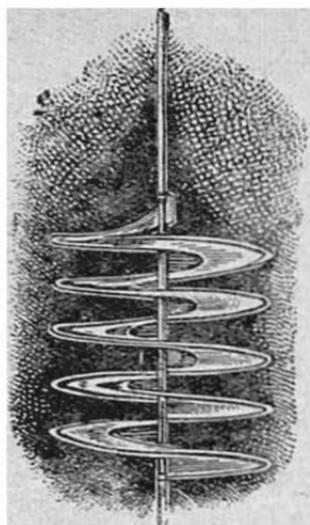


Рис. 47.

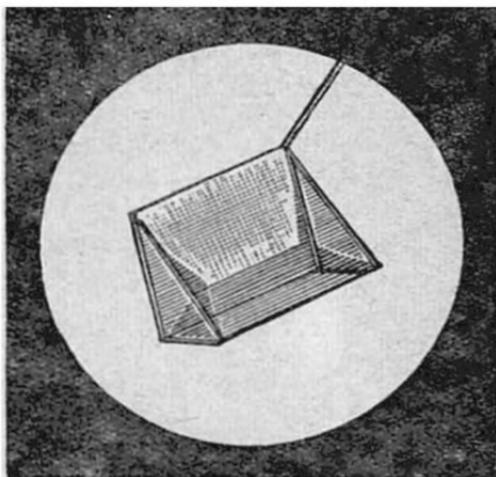


Рис. 48.

сигся к числу тех, которые очень легко может произвести каждый.

Стоит упомянуть о любопытном соотношении между винтовой поверхностью и поверхностью катеноида вращения (рис. 47 и 24). И та и другая представляют собой поверхности без кривизны, а потому их можно получить при помощи мыльных пленок. Вам известно, что плоский кусок бумаги можно сгибать, но нельзя растягивать, а потому листу бумаги можно придать форму цилиндра или конуса, причем ни одна часть его не будет растянута. Но его нельзя согнуть так, чтобы получился шар или часть шаровой поверхности, так как при этом средняя часть листа должна была бы растянуться или внешние части сжаться, чему бумага противодействует. Возьмем теперь сделанную из дерева или гипса модель катеноида и будем прикладывать к ее поверхности целый ряд смазанных клейстером полосок тонкой бумаги таким образом, чтобы они перекрещивались и находили одна на другую своими краями. У нас получится катеноид из бумаги, на котором мы обнаружим интересное соотношение. Когда клейстер высохнет, разрежем бумагу ножом вдоль какой-нибудь радиальной плоскости, чтобы можно было

снять бумагу с модели. Затем, держа бумагу за два разрезанных конца в месте перехвата, станем ее разводить, закручивая в то же время в разные стороны. Тогда перехват распрямится и станет плоским, а остальная часть бумаги изогнется без какого бы то ни было растягивания в правильную двухлопастную винтовую поверхность.

С помощью проволочных фигур, которым придана форма правильных геометрических тел, можно получить очень красивые образования из мыльных пленок, погружая эти рамки в мыльную воду. В случае трехгранной призмы все эти поверхности плоски, и всегда в одном ребре встречаются лишь три такие плоскости, притом под равными углами (рис. 48). Это и не удивительно, если принять во внимание, что сама проволочная фигура трехсторонняя. Рассматривая эту трехстороннюю фигуру с тремя пленками, встречающимися на центральной линии, вы склонны ожидать, что в случае четырехсторонней или квадратной призмы мы увидим четыре пленки, встречающие одна другую на средней линии. Замечательно, однако, что этого никогда не происходит, какую бы неправильную форму ни имела рамка и какое бы сложное строение ни имел клочок пены. На одном ребре никогда не может встретиться более трех плоскостей, а в одной точке — четырех ребер и шести плоскостей. Кроме того, пленки и ребра должны пересекать друг друга лишь под равными углами. Если случайно на один момент в одном ребре встретятся четыре плоскости или если углы не будут в точности равны друг другу, тогда получится во всяком случае неустойчивая форма; она не может оставаться в покое, и пленки будут все время скользить одна вдоль другой, пока они не придут в положение, при котором условия устойчивости будут выполнены. В результате кубическая форма дает фигуру, изображенную на рис. 49, в которой центральный квадрат должен быть параллель-

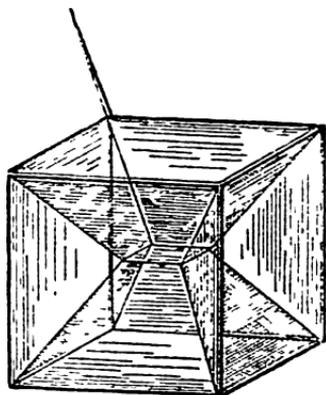


Рис. 49.

ным одной из шести граней куба и двенадцать других пленок встречаются одна с другой так, что выполняется основное правило, а именно: все углы равны 120° . Это основное правило можно иллюстрировать очень простым опытом, который каждый из вас может легко воспроизвести дома и который вы можете видеть теперь на экране. При помощи двух кусков оконного стекла, помещенных, приблизительно, на расстоянии сантиметра один от другого, устроено нечто вроде плоского стеклянного ящика, куда налито некоторое количество мыльной воды. Если теперь дуть через трубку, погруженную в воду, между пластинками образуется большое количество пузырей. Если пузыри достаточно велики, чтобы достать от одной стенки до другой, вы сразу увидите, что тут нигде не встречается больше трех пленок вместе и что все углы, под которыми пересекаются пластинки и ребра, равны между собой. Кривизна пузырей мешает видеть, что все углы действительно равны друг другу, но, если вы, чтобы избежать обманчивого влияния кривизны, рассмотрите небольшой участок пленок как раз там, где они встречаются, вы увидите, что сказанное мной верно. Вы увидите также, если только достаточно наблюдательны, что, когда выдуваются пузыри, порой на один момент встречаются вместе четыре пленки, но тогда они сразу начинают скользить одна вдоль другой и успокаиваются, когда приходят лишь в единственно возможное для них положение равновесия.

МЫЛЬНЫЕ ПУЗЫРИ И ЭФИР

Воздух внутри пузыря находится под давлением, производимым вследствие упругости и кривизны пленки пузыря. Если бы дать возможность воздуху проходить через стенку пузыря, то пузырь, конечно, скоро лопнул бы, как это и происходило, когда мы привешивали к пузырю кольцо и перепонку внутри кольца разрывали. Но в пузыре ведь нет отверстий, а потому вы можете ожидать, что газ, подобно воздуху, не будет

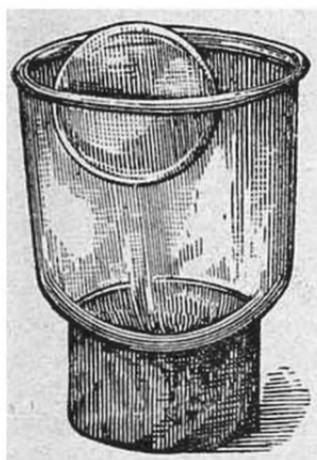


Рис. 50.

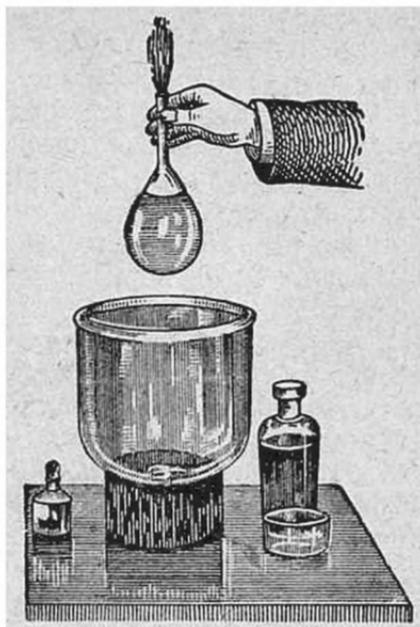


Рис. 51.

проходить через стенки пузыря. Тем не менее в действительности газы могут медленно проникать через стенки пузыря, а если производить опыт с некоторыми парами, то проникают они гораздо быстрее, чем мы могли бы предположить.

Эфир образует очень тяжелый и легко воспламеняющийся пар. Этот пар может почти мгновенно проходить сквозь стенки пузыря. Правда, это выражение не вполне точно: в действительности пар сгущается на наружной стороне оболочки и снова испаряется на внутренней ее стороне. На пропускную бумагу, брошенную на дно стеклянного колокола, я наливаю немного эфира, и колокол вскоре заполняется тяжелым паром эфира. Вы можете убедиться, что в колоколе что-то есть, но не простым глазом, так как колокол кажется пустым, а при рассматривании его тени на экране. Я осторожно наклоняю сосуд, и вы видите, как что-то выливается из него. Это и есть пар эфира. Нетрудно убедиться, что он тяжел; достаточно выдуть пузырь и сбросить его в колокол: как только пузырь коснется пара, он перестанет падать и будет плавать

по поверхности, подобно пробке на поверхности воды (рис. 50). Теперь исследуем пузырь и посмотрим, не проник ли пар внутрь пузыря. Я вынимаю его из колокола при помощи проволочного кольца и подношу его к огню: пузырь тотчас же вспыхивает. Этого, однако, недостаточно для доказательства того, что пар проник внутрь пузыря, потому что он мог сгуститься в достаточном количестве на поверхности пузыря и сделать его воспламеняемым. Вы припоминаете (см. стр. 24), что, когда я наливал пар эфира на поверхность воды, он сгустился на ней и в такой степени ослаблял силу поверхностного натяжения, что позволял проволочной сетке легко проходить через верхний слой воды. Чтобы проверить правильность первоначального объяснения, поступим иначе. Я выдуваю пузырь с помощью воронки и на короткое время опускаю его в пар эфира. Вынимаем пузырь из сосуда, и вы замечаете, что он висит подобно тяжелой капле; он утратил свою прежнюю правильную шарообразную форму, и кажется, что пар нашел себе путь внутрь пузыря. Удостовериться в этом мы можем, поднеся огонь к узкому концу воронки: пар вспыхивает и, выталкиваемый упругостью стенок пузыря, горит языком в двенадцать или пятнадцать сантиметров длиной (рис. 51). Вы могли также подметить, что, когда я вынул пузырь, пар стал выходить из пузыря наружу и падать тяжелым потоком. Конечно, это можно заметить, только рассматривая тень пузыря на экране.

ОПЫТЫ С МЫЛЬНЫМИ ПУЗЫРЯМИ

Вы, вероятно, заметили, что когда я производил опыты с каплями масла в смеси спирта с водой, то капли, сталкиваясь одна с другой, не сливались сразу. Они нажимали одна на другую и расходились, если их предоставляли самим себе, подобно тому как это происходило с каплями воды в фонтане, фотографический снимок которого я вам показывал. Вы, может быть, подметили также, что капли воды в керосиновой (или парафиновой) смеси отскакивали одна от другой или,

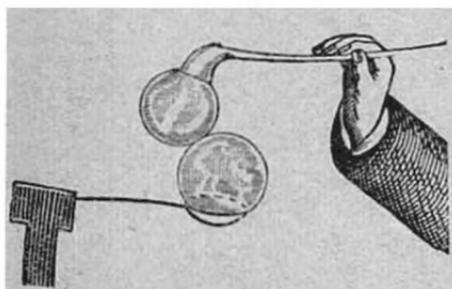


Рис. 52

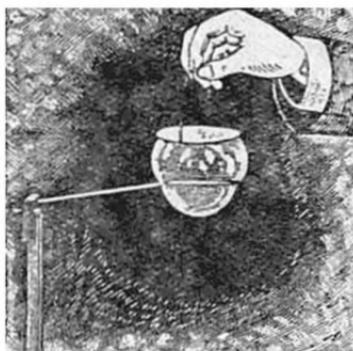


Рис. 53.

если они были наполнены керосином, образовывали пузыри, в которых плавали другие маленькие капельки, состоящие из воды. Во всех этих случаях между каплями оставался тонкий слой какого-нибудь вещества, который они не в состоянии были продавить. В одном случае это была вода, в другом — керосин, в третьем — воздух, смотря по обстоятельствам.

Окажутся ли и мыльные пузыри не способными продавить находящийся между ними слой воздуха, если их прижать друг к другу? Вы можете испробовать это дома так же хорошо, как и я здесь, однако, я сейчас произведу этот опыт. Я выдуваю два пузыря, и вот, когда я нажимаю одним на другой, они не сливаются и остаются раздельными (рис. 52).

Теперь я помещаю пузырь на кольцо, достаточно большое, чтобы через него мог пройти пузырь. Тут у меня в руке другое кольцо с плоской пленкой, полученной из пузыря после того, как у него был разорван один бок. Надавливая осторожно на пузырь плоской пленкой, я могу заставить пузырь пройти на другую сторону (рис. 53), и все же пленка и пузырь не сливаются. Пузырь можно проталкивать таким образом вверх и вниз много раз.

Теперь я выдуваю новый пузырь и подвешиваю его к кольцу. К этому пузырю я могу привесить другое кольцо из тонкой проволоки; я ввожу внутрь пузыря конец трубки и выдуваю второй пузырь, оставляя его внутри первого. Он медленно падает и останавливает-

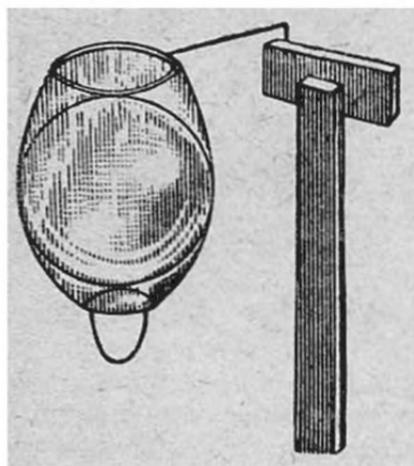


Рис. 54.

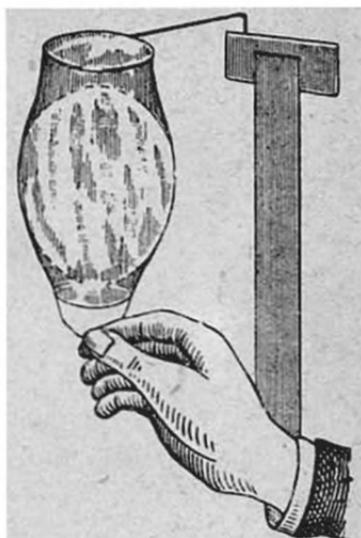


Рис. 55.

ся только тогда, когда дойдет до стенок наружного пузыря; он не будет лежать на дне наружного пузыря, так как тяжелое кольцо оттягивает эту часть сильно вниз, а будет касаться его несколько выше по круговой линии (рис. 54). Теперь я могу при помощи трубки удалить тяжелые капли жидкости с нижних частей пузырей и придать им чистый и гладкий вид по всей поверхности. Оттягивая кольцо вниз, я сжимаю внутренний пузырь и придаю ему форму яйца (рис. 55), или же я могу, слегка поворачивая кольцо, легким боковым движением оторвать его от пузыря. Тогда оба пузыря принимают совершенно правильную шарообразную форму (рис. 56). Я могу вытянуть воздух из внешнего пузыря до такой степени, что вы едва ли будете в состоянии видеть промежуток между двумя пузырями.

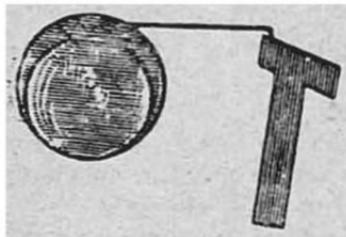


Рис. 56.

Затем я вдую воздух во внешний пузырь, и чем сильнее я дую, тем очевиднее, что оба пузыря в действительности вовсе не сливаются друг с другом; внутренний пузырь вращается кругом около центра внешнего пузыря,

и, когда последний в конце концов лопается, внутренний пузырь летит прочь, нисколько не пострадав от такого необычного обращения.

Есть очень красивое видоизменение предыдущего опыта, требующее, однако, небольшого количества зеленого красящего вещества, флуоресцеина или, лучше, уранина, которое растворяют в мыльной воде, в другом сосуде. Тогда можно выдуть внешний пузырь из чистой мыльной воды, а внутренний пузырь из окрашенной. Если теперь посмотреть на пузыри при обыкновенном свете, вы едва ли обнаружите между ними разницу; но, если направить на них солнечный свет или электрический свет дуговой лампы, лучше всего сконцентрированный при помощи линзы, то внутренний пузырь будет переливаться зеленым цветом, тогда как наружный останется прозрачным, как прежде. Они не сливаются совершенно, и хотя кажется, что внутренний пузырь покоится на внешнем, в действительности между ними остается тонкая прослойка воздуха.

Вы знаете, что светильный газ легче воздуха, а потому мыльный пузырь, выдутый струей светильного газа и предоставленный самому себе, сразу же взлетает к потолку. Выдуем с помощью светильного газа пузырь и поместим его на кольцо. Сразу же видно, что он стремится вверх. Будем вводить в него понемногу газ и обратим внимание на красивые формы, которые он принимает. Это все те же кривые поверхности. Их образует и падающая из трубки капля воды, с тем только различием, что здесь она обращена вверх. Прочность оболочки сейчас едва сдерживает стремление пузыря вверх, и вот он отрывается совершенно так же как это происходило с каплей воды.

Поместим на кольцо выдутый с помощью воздуха пузырь, внутри него выдуем другой пузырь, наполненный смесью воздуха с газом. Он всплывает вверх и располагается у верхнего конца внешнего пузыря (рис. 57). Затем начнем впускать понемногу светильный газ во внешний пузырь, пока окружающий газ не приобретет такую же плотность, какой обладает смесь во внутреннем пузыре. Теперь он уже не располагается у верхушки большого пузыря, а опускается и держится

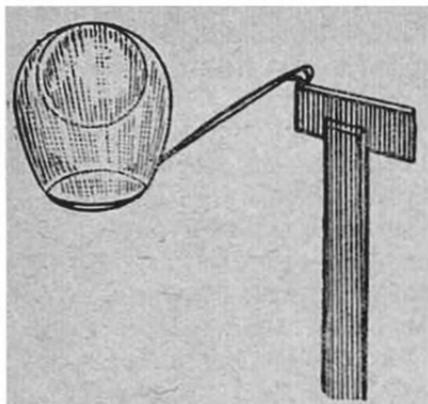


Рис. 57.

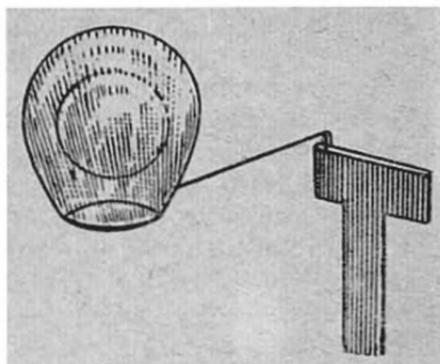


Рис. 58.

в центре его совершенно подобно тому, как плавала капля масла в смеси спирта с водой (рис. 58). Убедиться в том, что внутренний пузырь действительно легче воздуха, очень нетрудно: стоит только разорвать внешний пузырь, и тогда внутренний пузырь быстро поднимется к потолку.

Вместо того чтобы помещать пузырь на тяжелое неподвижное кольцо, я выдуваю теперь пузырь на легком кольце, сделанном из очень тонкой проволоки. В этом пузыре содержится только воздух. Выдуем теперь внутри этого пузыря другой с помощью светильного газа; второй пузырь устремится вверх и будет давить на верхнюю часть внешнего пузыря с такой силой, что поднимет его вместе с проволочным кольцом, одним метром нитки и привязанным к ней кусочком бумаги (рис. 59); при этом, несмотря на то, что тянет вверх всю эту установку один только внутренний пузырь, между двумя пузырями настоящего, тесного соприкосновения нет вовсе.

Есть другое видоизменение этого опыта (рис. 60). На проволочном кольце, которое у меня в одной руке, я выдуваю большой пузырь, а внутри него другой, маленький пузырь с газом. Затем другим кольцом, в другой руке, я прикасаюсь к большому пузырю подальше от того места, где внутренний пузырь прилегает к внешнему. Наконец, я растягиваю внешний пузырь в цилиндрическую трубку. Теперь можно перекачивать

маленький пузырь по стенкам цилиндрического пузыря. Если маленький пузырь близок по величине к кольцам, то, растягивая несколько трубку, легко задержать внутренний пузырь в нижней половине трубки, а потом, когда вздувается, отпустить его. Если прослойка воздуха между ним и стенками трубки очень тонка, тогда он будет очень медленно всплывать вверх, так как воздух верхней части трубки, чтобы пропустить сюда пузырь, должен перейти в нижний конец трубки через узкую кольцевую щель, остающуюся между внутренним пузырем и цилиндрической пленкой.

Теперь я выдуваю воздушный пузырь на неподвижном кольце и ввожу проволоку с кольцом на конце. На этом внутреннем кольце я выдуваю новый воздушный пузырь. Следующий затем пузырь будет выдут с помощью светильного газа и помещен внутри двух других. Он поднимается к верхней части второго пузыря. Второй пузырь я делаю несколько легче, вдывая в него немного газа, а внешний пузырь еще сильнее раздуваю воздухом. Теперь я могу удалить внутреннее кольцо, оставляя два внутренних пузыря свободными внутри большого внешнего пузыря (рис. 61). Многократное отражение света от поверхностей пузырей, дивные переливы цветов, красота и совершенство их форм пред-

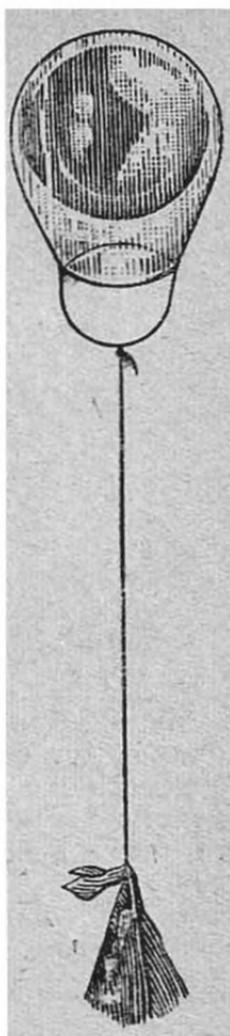


Рис. 59.

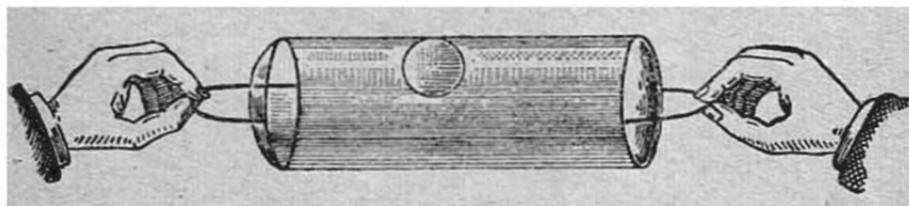


Рис. 60.

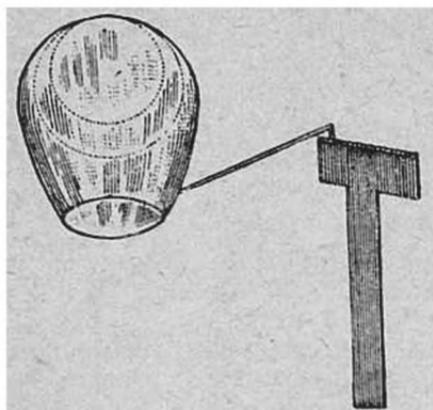


Рис. 61.

ставляют такую великолепную картину блеска и симметрии, равную которой трудно создать каким-либо другим путем. Мне остается теперь лишь выдуть четвертый пузырь в действительном соприкосновении с внешним пузырем и кольцом, чтобы дать возможность внешнему пузырю оторваться от кольца и всплыть вверх вместе с двумя другими пузырями внутри.

ПУЗЫРИ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Мы видели, что пузыри и капли во многих отношениях ведут себя одинаковым образом. Посмотрим, не будет ли и электричество производить на пузыри то же действие, какое оно производило на капли. Вы помните, какое действие оказывал кусок наэлектризованного сургуча на фонтанную струю. Когда две капли сталкивались, они, вместо того чтобы отскакивать, сливались в одну. Вот здесь, на этих двух кольцах, у нас два пузыря, которые как бы прилегают друг к другу,

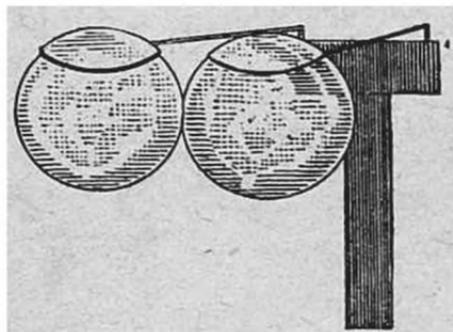


Рис. 62.

но в действительности не соприкасаются (рис. 62). В тот момент, когда я вынимаю палочку сургуча, они, как вы видите, соединяются и образуют один пузырь (рис. 63). Не имея под руками ничего, кроме двух мыльных пузырей, можно обнаружить присутствие даже самого ничтожного количества электричества

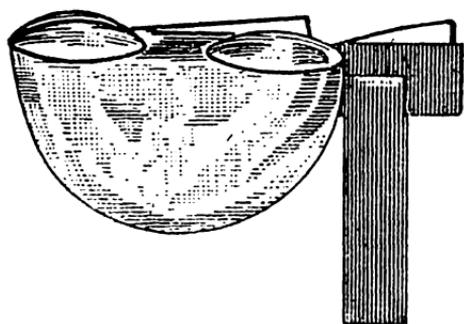


Рис. 63.

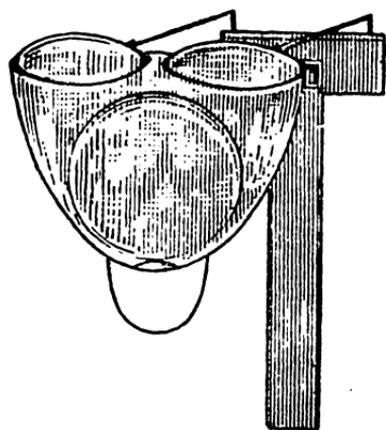
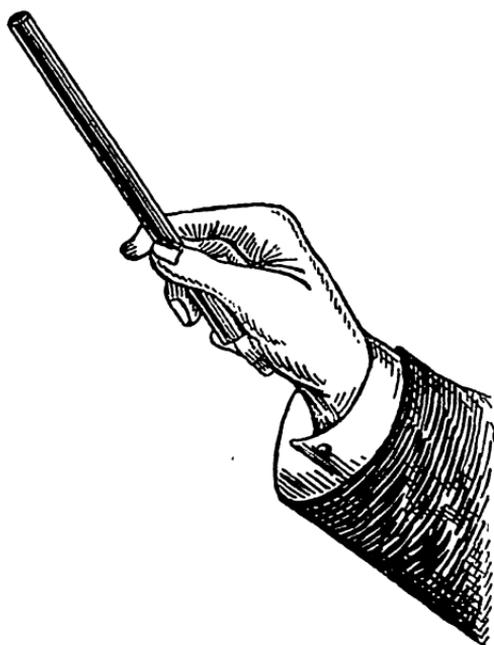


Рис. 64.



совершенно так же, как и при помощи водяных струй.

Как известно, внутри проводника электричества невозможно подметить влияние наружного электричества, как бы много его ни было или как бы близко вы ни подходили к поверхности проводника. Возьмем теперь два пузыря, один в другом, как это было изображено на рис. 51, и поднесем поближе к ним наэлектризованную палочку сургуча. Внешний пузырь представляет собой проводник, поэтому внутри него не будет заметно никакого действия электричества. Убедиться в этом легко. Пузыри остаются разделенными, хотя вы поднесли палочку сургуча так близко, что она оттягивает пузыри в сторону, и хотя оба пузыря так плотно прилегают друг к другу, что промежутка между ними вы не можете обнаружить. Будь здесь внутри хотя бы малейшее электрическое влияние, проникающее на глубину всего одной четырехтысячной доли миллиметра, оба пузыря сейчас же слились бы в один.

Вот еще один опыт, представляющий собой комбинацию двух последних и превосходно показывающий различие между внутренним и внешним пузырями. Здесь у меня третий пузырь, прилегающий к боковой стенке внешнего из тех двух пузырей, которыми я только что пользовался. В тот момент, когда я вытаскиваю палочку сургуча, два внешних пузыря сливаются, тогда как внутренний пузырь остается нетронутым, и тяжелое кольцо скользит вниз, к основанию образовавшегося теперь единственного внешнего пузыря (рис. 64).

МЫЛЬНЫЙ ПУЗЫРЬ

Мы хорошо знакомы с мыльными пузырями с самого раннего детства, и потому-то возможность их существования кажется нам чем-то само собой разумеющимся. Поэтому большинству из нас не приходит в голову задуматься над вопросом, почему возможно выдуть мыльный пузырь. А между тем уяснить себе возможность существования таких предметов гораздо

труднее, чем понять все те явления, которые я показывал вам и которые относятся к их свойствам и форме. Когда кто-нибудь уяснил себе, что поверхность жидкости обладает натяжением, что она ведет себя подобно расгнутой упругой перепонке, тогда объяснить существование мыльного пузыря кажется делом очень легким. Представляется естественным, что мыльный пузырь можно выдуть из мыльного раствора потому, что «перепонка» этого раствора очень прочна. В действительности же это совсем неверно. Чистая вода, из которой нельзя выдуть пузырь в воздухе и которая не образует даже пены, обладает «перепонкой», или поверхностным натяжением, в три раза большим, чем мыльный раствор, что подтверждается обычными способами, например, наблюдением поднятия жидкостей в капиллярных трубках. Даже в присутствии ничтожного количества мыла поверхностное натяжение воды падает с величины 7,7 миллиграмма на линейный миллиметр до 3 миллиграммов, как вычислил Плато из опытов над пузырями. Жидкость эта поднимается в капиллярной трубке лишь немного больше, чем на одну треть высоты поднятия воды. Мыльная пленка обладает двумя поверхностями, с натяжением каждая в три миллиграмма на один миллиметр, следовательно, растягивается с силой около шести миллиграммов на один миллиметр. Многие жидкости образуют пену, но не годятся для выдувания пузырей. Рэлей показал, что чистая жидкость не дает пены, тогда как смесь двух чистых жидкостей, например спирта и воды, образует пену. От чего бы ни зависело свойство жидкости давать пену, оно должно быть хорошо развито, чтобы из нее можно было выдувать пузыри. Я не раз говорил о натяжении мыльной пленки, как о величине постоянной, и это почти верно. Однако, профессор Виллард Гиббс показал, что это натяжение не может быть повсюду совершенно одинаковым. Рассмотрим, например, какой-нибудь большой пузырь или для удобства плоскую вертикальную пленку, натянутую на проволочном кольце. Если бы натяжение 6 миллиграммов на один миллиметр действительно было совершенно неизменным во всех частях, тогда средние части пленки, растягиваемые вверх и вниз верхней и нижней

частями пленки, в результате не удерживались бы ими вовсе и подобно другим лишенным опоры телам должны были бы падать с ускорением, сообщаемым силой тяжести, как падает выпущенный из рук камень. Однако, ничего подобного нельзя заметить у средней части такой пленки. Она, повидимому, остается в покое, и если здесь и есть какое-либо движение вниз, то слишком незначительное, чтобы его можно было подметить. Поэтому верхняя часть пленки должна быть натянута сильнее, чем нижняя часть, причем разность должна быть равна весу промежуточной части. Мы переворачиваем кольцо верхней частью вниз, и все же средняя часть пленки не падает. Пузырь поэтому обладает замечательным свойством приспособлять в тесных пределах свое натяжение к нагрузке. Виллард Гиббс считает, что это свойство пленки зависит от того, что вещество на ее поверхности не тождественно с веществом ее толщи. По его мнению, поверхность обогащена веществом, которое уменьшает ее поверхностное натяжение; это вещество при растягивании пленки становится на ее поверхности менее концентрированным, делая пленку более крепкой, а при сокращении концентрируется в пленке, делая ее более слабой. Его собственные слова настолько удачно и ясно излагают дело, что я предпочитаю просто процитировать из его «Термодинамики» относящееся сюда место:

«В толстой пленке (в противоположность тонкой пленке) усиление поверхностного натяжения при растягивании, необходимое для поддержания ее устойчивости, связано с избытком мыла (или какого-либо из его компонентов) на поверхности по сравнению с внутренней областью пленки».

Это аналогично действию масла на воду, описанному на стр. 29. Красивый опыт подтвердил теорию «обогащения». Измерив поверхностное натяжение мыльного раствора в течение первой сотой доли секунды его существования, мы найдем, что поверхностное натяжение γ него то же самое, что и у воды, так как «обогащение» поверхности не успело еще произойти. В этом опыте жидкость выходит из маленького эллиптического отверстия в тонкой пластинке, закрывающей конец трубки, соединенной с резервуаром, содержащим рас-

твор. Когда жидкость выходит из такого отверстия, как показано на рис. 65, поперечный разрез через струю имеет эллиптическую форму, изображенную внизу. Под влиянием поверхностного натяжения эллипс стремится превратиться в круг, но в момент превращения сечения в круг раз начавшееся движение не может остановиться сразу, и жидкость продолжает движение,

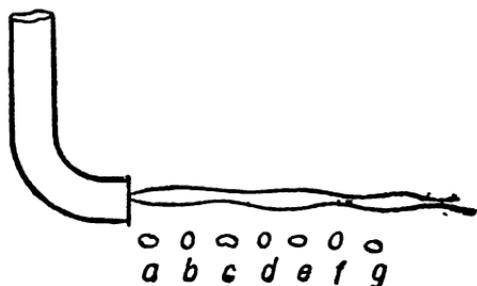


Рис. 65.

пока сечение струи не станет эллиптическим в другом направлении, как показано на рис. 65, *b*. Этот процесс продолжается с определенной скоростью, зависящей от силы поверхностного натяжения, плотности жидкости и толщины струи. Скорость жидкости зависит в то же время от глубины отверстия под свободной поверхностью, и если условия хорошо подобраны, во время переноса жидкости от *a* до *c* эллипс успевает завершить свою полную эволюцию, и это повторяется несколько раз. Если поверхностное натяжение станет меньше, эволюция эта будет совершаться медленнее, и расстояние между узлами *a—c—e—g* будет больше. При одной и той же высоте уровня жидкости расстояние между узлами как для чистой воды, так и для мыльного раствора сначала то же самое; это показывает, что их поверхностные натяжения вначале одинаковы.

Если же берется спирт, обладающий собственным поверхностным натяжением с самого начала, промежутки между узлами становятся больше, так как поверхностное натяжение относительно уменьшено в большей степени, чем плотность. Происходит то самое поверхностное сгущение, о котором говорил Гиббс.

Следующий опыт также указывает на существование поверхностного сгущения. Выдуем пузырь на горизонтальном кольце с диаметром, немного лишь большим диаметра кольца, и поднесем к верхней части пузыря пробку, смоченную раствором аммиака. Пузырь сейчас же станет отходить от пробки и перебираться на дру-

гую сторону кольца, как будто ему неприятен запах аммиака. Если затем поднести пробку к нижней части пузыря, он станет перебираться вверх. Что же происходит здесь в действительности? Аммиак вступает в соединение с некоторыми из составных частей мыла, сгущающимися на поверхности, и таким образом увеличивает натяжение пленки по одну сторону кольца; поэтому эта часть пленки сокращается и гонит пленку на другую сторону, где она не подвергается действию аммиака. Часть пленки, подвергшаяся действию аммиака, становится, кроме того, толще, остальная же тоньше, что видно по цветам, которые в последнем случае бывают более красивы и пестры.

Возвращаясь теперь к мыльной пленке, мы видим, что, какова бы ни была ее форма, верхние части ее натянуты несколько больше, чем нижние, и в случае вертикальной пленки разность равна величине, необходимой для поддержания веса промежуточной пленки. Однако, существует предел, за которым процесс этот уже не будет совершаться, — другими словами, существует предел величины мыльного пузыря. Мне неизвестно, каков этот предел. Я выдувал шарообразные пузыри до шестидесяти восьми сантиметров в диаметре, а другие, без сомнения, выдували пузыри еще больших размеров. Я брал также тонкий шнур в 3 метра длиной, связывал его концы и смачивал петлю в мыльном растворе, не давая ей закручиваться. Держа по пальцу каждой руки в петле, я погружал ее в мыльный раствор, затем вынимал и растягивал, образуя таким способом мыльную пленку в полтора метра длиной. Когда я держал петлю вертикально, пленка не разрывалась, показывая, что полтора метра меньше предельной величины мыльного пузыря даже умеренной толщины. Для тонкого пузыря этот предел отодвигается значительно дальше.

ПУЗЫРИ НЕ ИЗ МЫЛЬНОЙ ВОДЫ

Из всех известных материалов, пригодных для выдувания пузырей, наиболее совершенный — раствор мыла в мягкой воде или воде с глицерином. Этот раствор не

только легче всего изготовить, но, кроме того, он отличается текучестью и прозрачностью. Однако, пузыри можно выдувать и из иных материалов. Наиболее известный из них — это расплавленная смола, к которой прибавляется небольшое количество (примерно одна десятая или одна двенадцатая часть) пчелиного воска, гуттаперчи или льняного масла (последнего менее одной двенадцатой). Какова бы ни была смесь, она должна быть расплавлена, тщательно перемешана, и тогда из нее можно выдувать пузыри. Я выдувал из такого материала пузыри с помощью светильного газа. Они поднимались вверх и висели у потолка, но через день или около того они лопались, оставляя после себя в иных случаях больше грязи, чем это допустимо в жилом помещении. Плато, бравший смесь из пяти частей канифоли и одной части гуттаперчи, сплавленных при 150° Цельсия, получал более постоянные результаты. Он погружал в подобную смесь проволочные рамки, описанные на стр. 69—70, например, куб с ребром в пять сантиметров; полученные великолепные фигуры сохранялись в течение двух лет.

Интересные и забавные пузыри можно выдувать при помощи раствора сапонины. Очень небольшое количество сапонины, который бывает в продаже в виде белого порошка, растворяют в воде. Достаточно хороший раствор можно получить, нарезаая тонкими пластинками плоды конского каштана и вымачивая их в очень небольшом количестве воды. Слегка желтоватая жидкость, в которой, кроме сапонины, содержатся и другие вещества, достаточно богата сапонином, чтобы из нее можно было выдувать пузыри в семь или десять сантиметров в диаметре. С помощью любого из этих растворов могут быть получены пузыри; необходимо только брать трубку с очень узким каналом, чтобы выдувание не происходило слишком быстро. Когда эти пузыри выдуваются или когда они медленно сокращаются под влиянием собственного натяжения и гонят воздух назад через трубку, тогда они не обнаруживают ничего необычного. Они только кажутся слабыми и нежными, вот и все. Но стоит только из пузыря в два сантиметра или более диаметром высосать через трубку немного воздуха, как сразу выступят за-

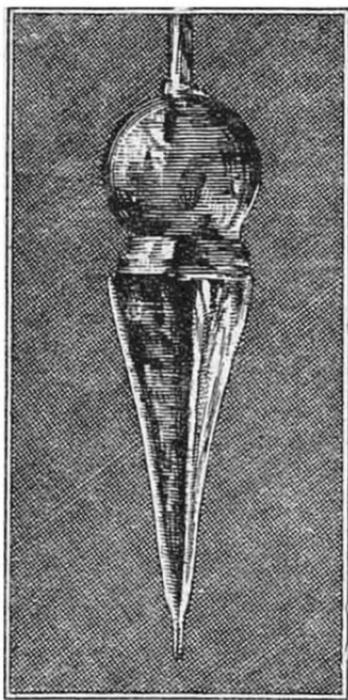


Рис. 66.

метные особенности. Пузырь этот не может быстро сокращаться и следовать за движением воздуха, как мыльный пузырь; он образует складчатый мешок (рис. 66), который, если оставить его в покое, медленно принимает сферическую форму или же превращается в шар сразу, скачком, если в него снова вдунуть воздух. Это можно повторять много раз, и изменения, особенно если изображение пузыря в увеличенном виде отбросить на экран, кажутся очень занимательными. Если из пузыря вытянуто достаточно воздуха, складчатый пузырь приобретает остроробристую форму, и все же, вдывая воздух, его можно снова превратить в шар. Особенность раствора сапонины за-

ключается в том, что поверхность его близка к твердому состоянию, в то время как внутренние слои остаются жидкими.

Плато произвел тщательное исследование этого свойства некоторых жидкостей, причем в растворе сапонины оно выступает более резко, чем у какой-либо иной жидкости. Пузыри из раствора сапонины так хрупки и нежны по сравнению с мыльными пузырями, что легко может возникнуть мысль о том, что поверхностное натяжение у них меньше. В действительности же верно обратное.

Рэлей нашел, что, если выдуть два одинаковой величины пузыря, один из мыльной воды, другой из раствора сапонины, с помощью двух соединенных между собой трубок, тогда пузырь из сапонины сокращается и вдвухает воздух в мыльный пузырь, показывая этим, что натяжение у пузыря из сапонины больше. Он нашел далее, что для получения равновесия диаметр мыльного пузыря надо уменьшить приблизительно до двух тре-

тей диаметра пузыря из сапони́на, который, как мы видели, является неустойчивым. Это показывает, что натяжение мыльной пленки составляет около двух третей натяжения пленки сапони́на. Для образования пены оказывается весьма подходящим раствор сапони́на в тысячекратном по весу количестве воды. Полученная из этого раствора пена имеет то же строение, что и мыльная пена, однако, в течение первых немногих секунд наблюдается заметное различие между ними, особенно если воспользоваться хорошим увеличительным стеклом. Каждый прямоугольный элемент пленки носит цветной рисунок параллельно ее периферии. Вследствие большой твердости пленок светлые цветные пятна не могут передвигаться по ним вверх, а остаются там, где возникли, и принимают прямоугольную форму. Затем, когда соединительная пленка лопается, она оставляет свой след на остающихся пленках. Таким образом на их поверхности остается летопись их существования в виде белых поверхностей и цветных фигур, подобно тому как поперечные борозды на зубе человека рассказывают нам историю неправильностей питания в ранние годы его жизни. Когда пленка лопается, особенно если она имела большую величину, процесс ее разрывания и толчкообразное отступление края разрыва можно проследить глазом, что представляет поразительную противоположность стремительной скорости разрыва у легкоподвижной пленки мыльного раствора.

Прибавление глицерина к раствору сапони́на, в количестве половины первоначального объема, в общем не влияет на образование концентрических цветных фигур, имеющих тот же вид, что и у раствора в чистой воде, зато все движения делаются еще более медленными. Переползание пленок в новое положение равновесия, когда одна из них будет разорвана, или сокращение края разорванной пленки — все эти явления становятся теперь настолько неторопливыми, что их спокойно можно наблюдать простым глазом. Одна капля мыльной воды в двадцати восьми граммах раствора сапони́на совершенно уничтожает это его свойство; прибавление еще одной или двух капель мыльного раствора придает раствору сапони́на все свойства мыльной воды, и пленки приобретают прежнюю текучесть. Присут-

ствие в воде совершенно ничтожных количеств сапони-на придает ей свойство пениться; для этого достаточна уже одна часть сапонины на 100 000 частей воды. Порошок сапонины легко распыляется, и тогда его можно случайно вдохнуть, что весьма неприятно, так как вызывает раздражение слизистых оболочек носа и глотки. Запах и вкус его неприятны. Его свойством давать стойкую пену пользуются при изготовлении безалкогольных напитков.

О пузырях из чистой ртути в воде мы уже говорили. Здесь мы упоминаем о них, как о примере красивых пузырей, получаемых не из мыльного раствора.

Можно также выдувать пузыри из расплавленного стекла и кварца, причем кварц будет иметь температуру, при которой сталь и огнеупорная глина становятся текучими, как вода. Однако, возможность выдувать подобные пузыри довольно равномерной толщины зависит от совершенно иного свойства, чем то, которое описано Гиббсом. Оно также ничего не имеет общего с поверхностной вязкостью, которой отличается сапонины. Способность расплавленного стекла давать пузыри такой совершенной формы зависит от его вязкости, сходной с вязкостью сахарного сиропа, причем вязкость эта возрастает по мере остывания стекла. При выдувании стекла тонкие части охлаждаются более быстро и становятся более вязкими; более текучие толстые части продолжают утончаться, тогда как тонкие части оказывают сопротивление. Этим обстоятельством и вызывается равномерная толщина стенок. Искусный стеклодув пользуется этим свойством стекла, вращая расплавленное стекло сначала для того, чтобы поддерживать везде одну температуру, а затем, когда какая-нибудь часть обнаруживает стремление растягиваться слишком сильно, он поворачивает ее вниз, в самое нижнее положение. Здесь в эту часть ударяет восходящий ток воздуха, образующийся около всякого нагретого предмета, охлаждает ее и таким образом препятствует дальнейшему ее растягиванию. Опытный стеклодув, дующая слегка в трубку или останавливаясь, поворачивая стекло и наблюдая его, а порой пользуясь опахалом, делает расплавленный комок стекла послушным орудием в своих руках. Этот процесс выдувания способен

захватить зрителя. При сильном и неумелом выдувании стекла получаются большие неправильной формы пузыри, которые нетрудно выдуть настолько тонкими, что на них можно будет наблюдать все разнообразные цвета мыльных пузырей. Лучше всего такие пузыри получаются из очень маленьких капель расплавленного стекла на конце узких трубок. Я полагаю, что пузыри из смолы можно выдувать благодаря тому же свойству, какое наблюдается у расплавленного стекла и кварца: более тонкие части их, охлаждаясь, становятся более вязкими.

Это более вероятно, чем предположение об особых условиях равновесия в поверхностном слое, вызванных сгущением на поверхности какой-либо из составляющих частей, как у мыльного пузыря.

Взболтанный с водой белок куриного яйца образует пену, но пузыри из белка можно выдувать лишь очень небольших размеров. Белок куриного яйца в соединении с желатином или клеем (обладающим подобным же свойством) скоро портится. Но достаточно ничтожных следов того или другого вещества в воде, чтобы смоченное такой водой стекло по высыхании покрылось тонким слоем, по которому можно рисовать и писать чернилами, причем чернила не расплываются. Этим способом можно воспользоваться, когда нужно быстро изготовить рисунки и картины для проекционного фонаря.

СЛОЖНЫЕ ПУЗЫРИ

Отдельный, парящий в воздухе пузырь представляет собой шар, и мы уже знаем, почему пузырь принимает именно эту форму. Причина заключается в том, что из всех существующих форм один только шар обладает наименьшей поверхностью при данном объеме. Другими словами, упругая мыльная пленка, стремясь сжать находящийся в ней воздух, принимает сферическую форму. Если бы пузырь имел другую форму, то при превращении в шар поверхность пленки должна была бы еще уменьшиться. Но если мы выдуем два пузыря в действительном соприкосновении друг с другом,

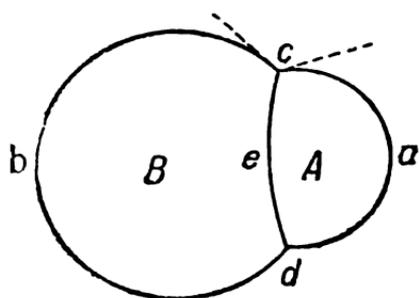


Рис. 67.

то оба они должны принять такую форму, чтобы поверхность обоих шаровых отрезков и часть, общая обоим пузырям, которую я буду называть перегородкой, были наименьшей поверхностью, способной заключать в отдельности два данных количества воздуха. Таким образом, мыльный пузырь дает нам простой, удобный и вместе с

тем наглядный путь для решения вопроса, который действительно является математической задачей. Предположим, что два пузыря, соединенные перегородкой, не равны друг другу и что рис. 67 представляет разрез через центры обоих пузырей. На этом рисунке буквой *A* обозначен малый, буквой *B* — большой пузырь. Мы знаем, что давление внутри пузыря пропорционально его кривизне или дроби, у которой числитель — единица, а знаменатель — величина радиуса пузыря. Давление в *A*, под которым я понимаю избыток над атмосферным давлением, будет поэтому больше, чем в *B*, в том же отношении, в каком радиус *B* больше радиуса *A*. Воздух в *A* сдерживается от вдувания в *B* кривизной перегородки. Действительно, эта кривизна уравнивает разницу давлений. Тот же самый факт может быть выражен и иными словами. Кривая и растянутая пленка *dac* гонит воздух пузыря *A* влево, и это заставляет две менее кривые, но одинаково растянутые пленки *dbc* и *dec* давить вправо для уравнивания действия более кривой пленки *dac*. Ту же мысль можно выразить совсем кратко: кривизна *dac* равна сумме кривизны *dbc* и *dec*. Рассмотрим теперь на чертеже точки *c* или *d*, каждая из которых представляет сечение с плоскостью чертежа окружности, по которой соприкасаются два пузыря; в любой точке этой окружности встречаются три пленки, и все они стягиваются с той же самой силой. Они могут уравнивать друг друга только в том случае, когда углы, под которыми они встречаются, равны или когда каждый угол равен 120° . Вследствие кривизны линий эти углы кажутся

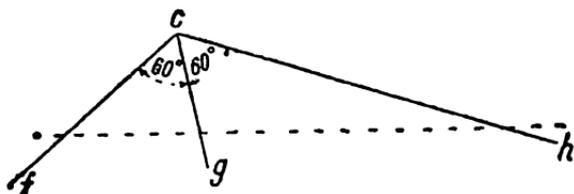


Рис. 68.

неравными, но я провел в точке c пунктиром касательные к двум кривым, и ясно, что они образуют друг с другом равные углы.

Условие относительно равенства углов не является независимым от условия, относящегося к кривизнам пленок; если одно из условий будет выполнено, то другое должно вытекать как следствие; это замечание справедливо и по отношению к условию, приведенному в начале этой главы, что общая поверхность пузырей должна быть наивозможно меньшей. Плато рассмотрел этот вопрос, как и все, касающееся мыльных пузырей, в своей напечатанной в Брюсселе книге «*Statique des liquides*» («Статика жидкостей»), которая является достойным памятником блестящему исследователю. Он описывает в ней простое геометрическое построение, позволяющее точно вычертить оба пузыря и разделяющую их перегородку.

Из какой-либо точки C проведем три линии: Cf , Cg , Ch , образующие два угла по 60° , как показано на рис. 68. Теперь пересечем их четвертой прямой линией, проведенной на рисунке пунктиром. Получившиеся три точки пересечения являются центрами трех окружностей, соответствующих трем возможным пузырям. Точка пересечения средней линии является центром окружности малого пузыря, из других же двух точек та, которая ближе к C , представляет собой центр второго пузыря, а та, которая находится дальше от C , — центр перегородки. Теперь, устанавливая одну из ножек циркуля последовательно в каждой из этих точек, проводим отрезки окружностей, проходящих через C , как показано на рис. 69, на котором линии рисунка 68 воспроизведены пунктиром, дуги же окружностей — сплошными линиями.

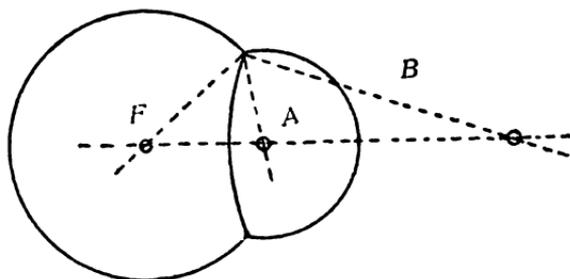


Рис. 69.

Начертив некоторое количество таких пузырей на листе бумаги достаточно жирными линиями, чтобы лучше видеть их, наложите на них кусок стекла. Смочив стекло мыльной водой, выдуйте на нем половину пузыря, а затем половину другого пузыря в соединении с первой. Теперь приготовим маленькую трубочку, лучше соломинку, с одним концом, залепленным сургучом, который потом прокалывается горячей булавкой, чтобы медленно выпускать воздух. С помощью этой соломинки будем осторожно вдвигать в пузыри воздух или вытягивать его из них до тех пор, пока пузыри не достигнут тех же размеров, что и на чертеже, причем будем двигать стекло так, чтобы пузыри оказались как раз над соответствующим им местом чертежа. Вы увидите тогда, как пузыри автоматически разрешают нашу задачу, причем края пузырей в точности на всем своем протяжении соответствуют сделанному вами чертежу.

Если пунктирная линия на рис. 68 пересекает Cf и Ch на равных расстояниях от C , тогда она будет пересекать Cg на половине этого расстояния от C , и мы будем иметь случай соприкосновения пузыря с пузырем двойного диаметра. В этом случае перегородка будет иметь ту же самую кривизну, что и большой пузырь, но обращенную в другую сторону, и по величине та и другая кривизны будут равны половине кривизны малого пузыря.

Если пунктирная линия рис. 68 будет пересекать Cf и Cg на равных расстояниях от C , тогда она будет параллельна Ch и никогда не пересечет ее. Оба пузыря будут тогда равны, и перегородка не будет иметь кри-

визны, или, другими словами, она будет совершенно плоской, и линия cd рис. 67, представляющая ее сечение с плоскостью чертежа, будет прямой линией.

Существуют и другие случаи, когда приложимы те же законы взаимной зависимости, как и закон о радиусах, находящихся в соприкосновении мыльных пузырей. В краткой форме его можно написать следующим образом:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{B} + \frac{1}{E};$$

при этом мы пользуемся буквами рис. 69 для обозначения длины радиусов соответствующих кругов. Возьмем для примера двояковыпуклое стекло или вогнутое зеркало; они обладают так называемым в оптике фокусом, расположенным на некотором расстоянии, которое обозначим буквой A ; в фокусе собираются солнечные лучи, превращая наш прибор в зажигательное стекло. Если мы поместим несколько дальше фокуса пламя свечи на расстоянии B (большем, чем A), тогда линза или зеркало дадут изображение пламени на расстоянии E , так что

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{B} + \frac{1}{E}.$$

Возьмем еще пример. Если электрическое сопротивление проволоки данной длины, скажем в A сантиметров, равно определенной величине, тогда сопротивление двух кусков такой же проволоки в B и E сантиметров длиной, соединенных так, чтобы ток разделялся между ними, будет такое же, что у A , если

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{B} + \frac{1}{E}.$$

Таким образом, мыльными пузырями можно воспользоваться для численного решения оптической и электрической задач.

Плато дает другое геометрическое построение, исследование которого гораздо более длинно и трудно, но которое так изящно, что я не могу воздержаться, чтобы не привести его здесь в заключение этой главы.

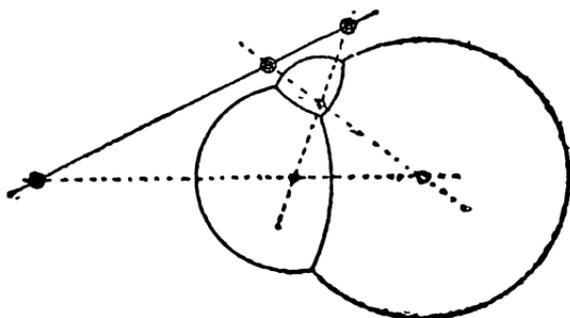


Рис. 70.

Когда три пузыря находятся в соприкосновении друг с другом, как показано на рис. 70, тогда, конечно, три перегородки будут встречаться одна с другой, а также и с пузырями под углами в 120° . Центры кривизны как трех пузырей, так и трех перегородок также лежат на одной плоскости. Но тут есть и другое обстоятельство, не столь очевидное, однако, истинное: центры кривизны трех перегородок, отмеченные на рисунке тремя двойными кружками, лежат на одной прямой линии. Для тех из вас, кто сведущ в геометрии, эвклидовой или аналитической, доказать это представляет такую же интересную задачу, как и задачу о трех пузырях и трех перегородках, заключающих и разделяющих три объема воздуха, причем общая поверхность их оказывается наименьшей из всех возможных. Доказательство положения, что три пленки, вычерченные согласно построению рис. 68, обладают установленными кривизнами, значительно легче, и я рекомендую начинать именно с него. Если вам нужна руководящая нить, то проведите из точки, где пунктирная линия пересекает Sg , линию, параллельную Sf , и разберитесь, что теперь перед вами.

МЫЛЬНЫЕ ПУЗЫРИ ПОД ОТКРЫТЫМ НЕБОМ

Как ни красивы мыльные пузыри в комнате, они еще более выигрышают, когда их пускают на открытом воздухе; особенно красивое зрелище представляет большой пузырь, дважды отражающий небо верхней и

нижней своей цветной частью. Первое, на что вы обратите внимание, это причудливое отражение предметов, воспроизводящее в сферической перспективе окружающие деревья или дома. Я посоветовал бы фотографам-любителям не пожалеть труда сфотографировать отражение какого-нибудь красивого пейзажа с поверхности мыльного пузыря. На этом снимке здания, расположенные позади камеры, окажутся посредине; расположенные по бокам будут причудливо изогнуты и искажены, тогда как группа высоких зданий впереди отразится в перевернутом виде в верхней части пузыря. Затем все это повторяется в обратном виде в нижней части пузыря, и происходит смещение двух налагающихся друг на друга картин. Изумительное впечатление производит портрет, снятый со сверкающей поверхности мыльного пузыря. Таким способом можно сфотографировать и целую группу людей, которые тесно располагаются на снимке вокруг центральной фигуры. Если желательно избежать обратного изображения, можно воспользоваться только одной половиной пузыря. Вопрос о том, как должны быть расположены пузырь, фотографическая камера и объект, я предоставляю решать любителям фотографии: это будет для них простая и вместе с тем интересная задача.

Как ни привлекательны пузыри под открытым небом, все же выдуванием их не следует, как правило, заниматься вне комнаты по двум основаниям. Редко бывает такая безветренная погода, чтобы можно было получить большие пузыри. С другой стороны, в пузыри надо вводить вместе с воздухом небольшое количество легкого газа, чтобы они не стремились ни падать, ни подниматься, а следовали каждому дуновению ветра. Я опишу наиболее удобный способ. Выберем яркий солнечный или светлый облачный день, но при очень слабом ветре, и станем у открытого окна, где получается легкий ток воздуха по направлению от дома. Его можно в известной степени регулировать, открывая окна и двери для равномерного впуска воздуха с наветренной стороны или, если напор слишком силен, открывая окна на подветренной стороне. Наготове должна быть резиновая трубка, прикрепленная одним кон-

цом к газовому рожку. Чтобы трубка не перекручивалась, она должна быть привязана, но короткий кусок ее нужно оставить свободным, чтобы можно было придавать трубке любое направление.

Хорошо также иметь поблизости часы, чтобы слышать удары маятника.

Когда все это устроено и приготовлены трубка и мыльный раствор (лучше всего по рецепту на стр. 106), возьмем в одну руку резиновую трубку. Когда требуется, мы ее будем зажимать, чтобы предупредить истечение газа. Погрузим трубку в раствор и, вынув ее оттуда, дадим газу выдуть мыльный пузырь. Когда пузырь станет величиной с яблоко или апельсин, он, оторвавшись от трубки, не будет ни падать, ни подыматься. Подходящий размер пузыря зависит от веса жидкости в нем и от подъемной силы газа. Если конец трубки мал, то и количество захваченной жидкости невелико, и даже маленький пузырь может плавать в воздухе; если трубку соединить с другой трубкой с расширенным концом, тогда жидкости будет захвачено больше и придется выдуть большой пузырь, чтобы он мог плавать в воздухе. Нетрудно, установив газовый кран в определенном положении, установить, сколько для этой цели необходимо газа. Для этого нужно считать удары маятника во время вытекания газа и потом в надлежащий момент отрывать пузырь. При достаточном навыке число ударов маятника, найденное опытом, может служить хорошим руководством.

Если выдуть пузырь, как раз едва способный плавать, и выпустить его в окно, он полетит прочь. Если дело происходит в городе среди зданий, а не среди деревьев, тогда он может сверх ожидания сохраняться долгое время; он будет носиться в разные стороны, огибать стены, не касаясь их и удивительно ловко избегая действия вихрей; то он остановится неподвижно или почти неподвижно, то его подхватит и закрутит воздушный вихрь, растянув его в виде колбасы или даже, как мне пришлось видеть, разбив его на два или на три отдельных пузыря. Интересно также наблюдать, как долго могут летать пузыри небольшой величины сквозь завесу дождя.

Но среди деревьев их жизнь коротка: их увлекает ветром в гущу веток, и там им приходит конец. Если надувать мыльные пузыри только светильным газом, тогда пузыри, способные плавать, окажутся слишком маленькими, чтобы на них могли образоваться большие поверхности разнообразной окраски. Вдуть же большее количество газа в них нельзя, потому что иначе они сразу поднимутся вверх и исчезнут в воздушном пространстве. Выход один: вдуть в такой пузырь воздух. Вес мыльного раствора и подъемная сила газа уравнивают друг друга; что же касается веса введенного воздуха, то он возмещается потерей веса пузыря, происходящей от увеличения в объеме. Поэтому для выдувания больших пузырей, способных только плавать, не падая вниз и не поднимаясь вверх, нужно выдуть воздухом с помощью трубки с широким раструбом пузырь и во время выдувания ввести сбоку в него смоченный мыльным раствором конец резиновой трубки, соединенной с источником газа.

Впуск газа нужно контролировать, следя за маятником. Продолжительность впуска газа здесь такая же, как прежде, но ее нужно увеличить, если взятая трубка захватывает большее количество жидкости.

Иногда удобно помещать пузырь на кольцо с ручкой, чтобы его можно было ставить на тренажер; кольцо может иметь пять или восемь сантиметров в диаметре и, конечно, предварительно смачивается раствором. Главная трудность при этом заключается в том, чтобы заставить пузырь полететь.

Правильным движением кольца будет легкое движение прямо от пузыря, но не вбок. Впрочем, практика научит этому лучше, чем любое описание. Другой способ заставить пузырь благополучно покинуть кольцо состоит в том, что вдывается другой пузырь в действительном соприкосновении с первым пузырем и кольцом. Затем заставляют малый пузырь войти в кольцо, тогда большой пузырь оторвется при ничтожном толчке. Таким образом можно выдувать и пускать отдельные пузыри с диаметром около 30 сантиметров, и хотя такие большие пузыри существуют не так долго, как малые, все же они сохраняются

достаточно долго, чтобы успеть ими полюбоваться, когда они плавно проносятся в воздухе.

Если количество газа подобрано неудачно, тогда пузыри могут или медленно подниматься вверх, или опускаться. Случайно мне пришлось наблюдать пузырь, в котором нехватало легкого газа. От него оторвалась висевшая внизу капелька воды. Освободившись от лишнего груза, пузырь стал медленно подниматься и поплыл дальше. Часто случается, что от летящего пузыря отрывается капелька жидкости, и тогда замечается изменение пути, связанное с уменьшением веса.

Я уже говорил о том, что можно сделать перегородки нескольких соприкасающихся пузырей либо плоскими, либо слегка искривленными, придав соприкасающимся пузырям одинаковые или почти одинаковые размеры. С помощью поддерживающего кольца можно выдувать группы одинаковых или почти одинаковых пузырей, соединенных по два, по три, по четыре или по пяти вместе. Если угодно, можно вводить светильный газ только в один из них, и тогда он один будет поддерживать все расположенные ниже пузыри. Такие сложные пузыри еще более великолепны, чем одиночные, потому что солнечный свет, отражаясь от больших плоских поверхностей, переливается всеми оттенками драгоценных камней, что представляет поразительный контраст с более стойкими и скромными пятнами света, отражающегося от сферических поверхностей.

Другая разновидность сложных пузырей, которую можно рассматривать как крупноячеистую пену, тоже интересна, но не так красива, как только что описанные сложные пузыри. Зато ее очень нетрудно приготовить. Поместим в большой сосуд блюдце и нальем в блюдце мыльный раствор. Затем поместим конец резиновой трубки неглубоко под поверхность жидкости и укрепим его в этом положении. Теперь будем регулировать приток газа таким образом, чтобы поднимающиеся на поверхности пузыри имели несколько больше двух сантиметров в диаметре. Такой пузырь в отдельности, если только он не будет очень тонким, не способен подниматься вверх, и, тем

более, он не в состоянии будет оторваться от поверхности жидкости. Но, когда наберется достаточное количество пузырей, образуется крупночешуйчатая пена и жидкость будет стекать с верхних пузырей, пока они не станут достаточно легкими, чтобы поддерживать свой собственный вес. В результате сначала образуется большая полушаровидная масса пены, а затем, по мере того как верхние части, становясь легче, начнут вытягиваться вверх, вся масса примет продолговатую форму, пока, наконец, колонна высотой, может быть, в тридцать сантиметров и приблизительно такого диаметра, как блюдце, не станет постепенно подниматься, затем оторвется и полетит прочь. Такая масса может задеть встречную стену и, потеряв часть поверхностных пузырей, отлететь в сторону в уменьшенном несколько объеме. Блюдце ставится в большой сосуд потому, что масса пены заставляет большое количество жидкости переливаться через края, и без этой предосторожности она терялась бы без пользы. Если масса пены коснется большого сосуда, то она уже не отделится так легко, и во избежание этого следует ставить блюдце не просто на дно большого сосуда, а на какую-нибудь подставку, например на стакан. Конечно, и эта масса пены обладает теми же характерными свойствами, которые были описаны на стр. 94. Здесь тоже на одной линии не встречается более трех поверхностей или более четырех поверхностей в одной точке, причем они всегда образуют между собой углы в 120° . Группы из четырех или пяти больших пузырей одинаковой величины дают совершенное воспроизведение ромбоэдрического конца ячейки пчелиных сот.

Заслуживает внимания вопрос, сколько газа необходимо для существования пузыря данного цвета или как мал может быть пузырь определенного цвета, поддерживаемый в воздухе светильным газом. Нетрудно при помощи несложных расчетов найти эту величину. Один кубический сантиметр воздуха весит 1,3 миллиграмма. Светильный газ весит около $\frac{2}{3}$ веса того же объема воздуха, если только в нем не содержится слишком много водяного газа; таким обра-

зом, его подъемная сила составляет около $\frac{3}{5}$ веса того же объема воздуха. Поэтому один кубический сантиметр будет поднимать $1,3 \times \frac{3}{5}$ миллиграмма. Это составит 0,78 миллиграмма. Сферический пузырь содержит немного больше половины кубических сантиметров по сравнению с вмещающим его (описанным около него) кубом. Множителем для превращения объема куба в объем сферы с диаметром, равным стороне куба, является число 0,5236, немного больше 0,5; или объем шара в точности равен $\frac{2}{3}$ объема вмещающего его (описанного около него) цилиндра. Поверхность шара в точности равна боковой поверхности цилиндра, а эта поверхность составляет 0,7854, или немного более $\frac{3}{4}$ поверхности четырех граней описанного куба. Для примера предположим, что диаметр пузыря — один сантиметр: объем описанного куба составит один кубический сантиметр, а потому объем шара с диаметром в один сантиметр составит 0,5236 кубического сантиметра. Поверхность четырех граней односантиметрового куба составляет 4 квадратных сантиметра, а это число, умноженное на 0,7854, даст 3,1416 квадратного сантиметра, что представит собой поверхность односантиметрового шара. Возьмем пленку яркозеленого цвета, весящую 0,05 миллиграмма на квадратный сантиметр. Тогда наш зеленый односантиметровый пузырь будет содержать $0,05 \times 3,1416$ миллиграмма воды, т. е. 0,16 миллиграмма. Если его наполнить светильным газом, тогда подъемная сила газа составит $0,5236 \times 0,78$, или 0,4080 миллиграмма.

Это несколько меньше трехкратного веса пузыря. Если бы поэтому зеленый пузырь был выдут диаметром в одну треть сантиметра вместо одного сантиметра, тогда его поверхность, а следовательно, и вес были бы уменьшены в отношении $3 \times 3 : 1$, тогда как количество газа, а следовательно, и его подъемная сила были бы уменьшены в отношении $3 \times 3 \times 3 : 1$. Поэтому пузырь яркого яблочно-зеленого цвета с диаметром в одну треть сантиметра, наполненный светильным газом, будет плавать в воздухе.

ПРАКТИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Я надеюсь, что эти практические указания принесут пользу тем, кто захочет сам повторить описанные уже опыты.

БОЛЬШАЯ КАПЛЯ В РЕЗИНОВОЙ ПЕРЕПОНКЕ

Кусок резины приблизительно такой толщины, как у резиновых воздушных шаров до их наполнения газом, нужно натянуть на деревянное или металлическое кольцо в 40—50 сантиметров диаметром и тщательно укрепить по краю при помощи нескольких оборотов проволоки. Проволока лучше будет удерживать края резиновой перепонки, если в кольце сделан желобок. Этот опыт в меньшем масштабе не удастся.

ВЫСКАКИВАЮЩИЙ ПОПЛАВОК

Приготовить его нетрудно, взяв легкий стеклянный шарик сантиметров в 5 диаметром, например шарик из посеребренного стекла, какие употребляются в качестве елочных украшений, или же шарик пипетки, которым я пользовался. Надо пропустить через отверстия шарика проволоку толщиной около 1—2 миллиметров и прочно и непроницаемо для воды укрепить ее в этих отверстиях с помощью сургуча. На расстоянии 3—5 сантиметров от шарика к проволоке припаивается или, если это окажется слишком трудным, привязывается, или прикрепляется с помощью сургуча тонкая плоская проволочная сетка. Затем к нижнему концу привешивается кусок свинца, с кото-

рого соскабливается слой за слоем, пока сетка будет задерживаться поверхностным слоем воды. Указанные размеры и материалы не имеют существенного значения и могут быть заменены другими¹.

ПАРАФИНИРОВАННОЕ СИТО

Надо взять кусок довольно густой медной сетки, у которой на протяжении сантиметра помещается около 8—10 проволок, и вырезать из нее круг около 20 сантиметров в диаметре². Эта сетка накладывается на основание цилиндрического куска дерева (или стакана) так, чтобы края ее выступали кругом на 2—3 сантиметра. Затем следует осторожно прижимать сетку кругом руками, придерживая ее вместе с тем плотно на основании цилиндра, пока весь край не будет отогнут по всему протяжению. Это нетрудно сделать, потому что проволока без труда поддается искривлению. Затем для того, чтобы сделать края полученного таким образом решета твердыми, нужно их обернуть по краю несколькими оборотами толстой проволоки. Эта проволока припаявается к сетке, но можно ограничиться и тщательным обматыванием.

Некоторое количество парафина или несколько парафиновых свечей лучшего качества расплавляется в чистой мелкой тарелке, но не на огне, что не безопасно, а на горячей плите. Когда парафин расплавится и станет прозрачным, как вода, в тарелку опускают приготовленную сетку и, когда она прогреется, быстро вынимают и одним или двумя ударами о стол стряхивают парафин, чтобы отверстия остались открытыми. Сито оставляют остыть в перевернутом виде, причем нужно тщательно оберегать его, чтобы парафин не был поцарапан или стерт. Лучше всего положить его в шкаф таким образом, чтобы стекающий парафин не запачкал полки шкафа.

Наполнить такое сито водой или пустить его плавать по воде уже не представляет труда.

¹ Стекланный шарик можно заменить пробкой, сквозь которую продевается проволока. — *Ред.*

² Можно и значительно меньше.

ТОНКИЕ ТРУБКИ И КАПИЛЛЯРНОСТЬ

Следует приобрести в специальном магазине химическое стекло или в аптекарском магазине стеклянные трубки толщиной с гусиное перо. Если трубка слишком длинна, ее следует разрезать, что делается так: положив трубку на стол, на ней делают надрез трехгранным напильником; затем, взяв крепко трубку обеими руками близ сделанной царапины, ее разламывают по направлению от себя, производя при этом растягивающее действие. Этим способом даже довольно толстые трубки разламываются ровно и легко. Чтобы изготовить из такой трубки более узкую, среднюю часть ее вносят в широкое и плоское пламя газового рожка или спиртовки. Трубку все время поворачивают для равномерности нагревания, пока она, наконец, не станет настолько мягкой, что ее трудно будет поддерживать в прямом виде. В этот момент трубку нетрудно согнуть под любым углом, но, если ее желательнее растянуть, тогда ее оставляют еще на некоторое время в пламени, пока покрывающая среднюю ее часть копоть не потрескается и не сойдет. Затем трубка быстро вынимается, и оба конца ее растягиваются в противоположные стороны, причем из средней части образуется длинная узкая трубка. Ее можно сделать и тоньше и толще, регулируя пламя и способ растягивания; впрочем, никакие указания не дадут в этом деле так много, как самый небольшой практический опыт. Не следует ускорять охлаждение трубок дутьем, а тем более смачивать их. Чем уже трубки, тем выше поднимается в них чистая вода. Для подкрашивания воды нельзя пользоваться обыкновенными акварельными красками, так как они не растворяются в воде и засоряют трубки. Нужно взять небольшое количество вполне растворимой синей анилиновой краски. Полезно прибавить к ней немного уксуса.

КАПИЛЛЯРНОЕ ПОДНЯТИЕ ВОДЫ МЕЖДУ ДВУМЯ ПЛАСТИНКАМИ

Для этого опыта берутся две чистые стеклянные пластинки в виде квадратов с ребром примерно в 8—12 сантиметров. Пластинки должны быть совершенно чисты и хорошо смочены. Мыть их можно мылом и горячей водой.

СЛЕЗЫ ВИНА

Их легко наблюдать в стакане, наполовину наполненном портвейном. Портвейн можно заменить смесью из 2—3 частей воды и 1 части винного спирта, подкрашенного очень небольшим количеством розанилина, красной анилиновой краски очень красивого цвета¹. На большой винный стакан достаточно крупинки краски величиной с горчичное зерно. Стенки стакана надо смочить вином или смесью.

ШАРИКИ ЖИДКОСТИ

Чтобы не плавить золото для получения шариков жидкости, можно брызнуть водой на поверхность стола, густо посыпанную ликоподием или каким-нибудь другим порошком, или налить на гладкую поверхность стола с небольшой высоты немного ртути: тогда легко наблюдать различие в форме маленьких шариков и крупных капель. Еще лучше это различие можно обнаружить, воспользовавшись увеличительным стеклом. С ртутью следует обращаться осторожно, не давая ей касаться золотых и серебряных вещей.

¹ Можно подкрасить также фуксином, метиленовой синью или другой анилиновой краской — Ред.

ОПЫТ ПЛАТО

Чтобы воспроизвести этот опыт, требуется много тщательности и труда. Нужно влить в чистую бутылку столовую ложку прованского масла и налить на него смесь девяти частей, по объему, винного спирта (не древесного спирта, который примешивается в числе прочих веществ к винному спирту для денатурирования его) и семи частей воды. Надо встряхнуть смесь и дать маслу осесть в течение суток. Этой смесью спирта и воды наполняется стакан, а затем с помощью тонкой стеклянной трубки, опускаемой на половину глубины жидкости, в нее вводится очень небольшое количество воды. Вследствие этого нижняя половина жидкости станет несколько тяжелее. Далее, в масло погружается трубка, небольшое количество масла захватывается путем закрывания верхнего конца трубки пальцем и осторожно переносится в стакан. Если масло падает на дно, в нижнюю часть стакана, надо прибавить несколько больше воды. Если же случится, что масло совсем не опускается, тогда в верхнюю часть стакана надо прибавить спирту. В конце концов можно достичь того, что масло будет плавать как раз посредине стакана. После этого можно прибавить еще некоторое количество масла, тщательно наблюдая за тем, чтобы оно не касалось стенок стакана. Если жидкость в нижней половине стакана будет лишь немного тяжелее, а в верхней лишь немного легче, чем масло, тогда довольно большая капля его будет иметь почти совершенно шарообразную форму. Если на нее смотреть через боковые стенки стакана, она не будет казаться шарообразной, так как вследствие кривизны стенок изображение капли будет увеличено в горизонтальном направлении. Вполне круглую форму она будет иметь при рассмотрении сверху или снизу, через дно стакана, в чем можно убедиться, поместив в жидкости, как раз над маслом, соответственных размеров монету.

Для того чтобы мы могли наблюдать истинную форму капли, сосуд должен либо сам быть шарообразной формы, либо же стенки его обязательно должны быть плоскими.

Вращение капли масла и отрывание колец не имеют существенного значения для этого опыта. Впрочем, если читатель сумеет укрепить кружок размером с трехкопеечную монету на прямой проволоке и привести эту систему во вращение без толчков, тогда он увидит отрывание кольца, которое при внезапной остановке вращения или сольется опять с большой каплей, или разобьется на три или четыре маленьких шарика совершенной формы. Прежде чем опускать кружок в смесь спирта с водой, его надо смазать маслом.

ДРУГИЕ ЖИДКОСТИ

Я не рекомендую применять сероуглерод из-за его дурного запаха и огнеопасности. Гораздо удобнее пользоваться ортотолуидином. Эта жидкость вполне отвечает нашей цели, за исключением образования кольца при вращении¹. Для этого более вязкое масло, которым впервые воспользовался Плато, более пригодно, чем какая-либо иная жидкость.

ХОРОШАЯ СМЕСЬ ДЛЯ МЫЛЬНЫХ ПУЗЫРЕЙ

Мыльные пузыри из обыкновенной мыльной воды держатся недостаточно долго для многих из описанных опытов, хотя они иногда и удаются. Плато прибавлял к мыльной воде глицерин, который в сильной мере повышает устойчивость пузырей. При этом глицерин должен быть совершенно чист, и обыкновенный глицерин не вполне пригоден. Для приготовления мыльного раствора нужно брать дистиллированную воду, но если ее трудно получить, то можно восполь-

¹ Удобно пользоваться анилином в растворе поваренной соли. Анилин можно заменить керосином с примесью хлороформа или нитробензола. Подробности об этом см. в книге А. Б. Млодзеевского «Демонстрации по молекулярной физике». — *Ред.*

зоваться и чистой дождевой водой, в особенности с черепичных крыш. Конечно, при собирании дождевой воды надо выждать, когда дождь смое сначала всю грязь с крыш. И, наконец, если нет свежей дождевой воды, можно взять прокипяченную и охлажденную воду. Лучшую смесь можно приготовить следующим образом. Чистая, хорошо закупоривающаяся бутылка наполняется на три четверти своего объема водой. В нее всыпается одна сороковая часть по весу олеиновокислого натра, который почти целиком будет плавать на поверхности. Все это оставляется на сутки, пока олеиновокислый натр не растворится. Остающаяся свободной часть бутылки почти целиком заполняется совершенно чистым глицерином¹, и бутылка сильно встряхивается, или жидкость переливается в другую чистую бутылку и обратно, и так повторяется несколько раз. Затем бутылка закупоривается и ставится примерно на неделю в темное место. После этого чистую жидкость без пены, которая собирается в верхней части бутылки, переливают в другой сосуд при помощи сифона, представляющего собой изогнутую трубку, одно колено которой, помещаемое внутрь бутылки, короче другого — наружного. Сюда прибавляют две или три капли концентрированного аммиака на каждый литр жидкости. Жидкость сохраняется в хорошо закупоренной бутылке в темном месте. Эту бутылку не следует открывать каждый раз, когда выдуваются пузыри, а надо отлить часть жидкости в маленькую бутылку для частого расходования. Никогда не следует оставшуюся жидкость вливать обратно в большую бутылку. При приготовлении раствора не следует ни нагревать, ни фильтровать его. И то и другое испортит его. Никогда бутылка не должна оставаться открытой и жидкость подвергаться действию воздуха дольше, чем это необходимо. Такая жидкость оказывается еще вполне хорошей после десяти лет сохранения. Я дал такие подробные указания потому, что именно этим способом мне удалось получить самый лучший раствор.

Так как не всегда можно достать чистый олеиново-

¹ Плотность его должна быть около 1,23. — Ред.

кислый натр, то, может быть, кто-нибудь пожелает изготовить олеиновокислый натр самостоятельно. Вот способ, любезно указанный мне Декгэмом:

«Чистую олеиновую кислоту лучше всего можно получить из сала, которое почти не содержит какой-либо иной менее насыщенной кислоты, чем олеиновая, омылением его едким кали, осаждением мыльного раствора уксуснокислым свинцом и извлечением безводной свинцовой соли эфиром. Растворенная свинцовая соль разлагается хлористоводородной кислотой под эфиром, освободившаяся кислота растворяется в аммиаке, и раствор осаждается хлористым барием. Затем бариевую соль высушивают, кипятят в горячем алкоголе и предоставляют соли кристаллизоваться из горячего раствора. Кристаллизованная соль разлагается или крепкой минеральной кислотой, или винной кислотой. Так обыкновенно и поступают при получении чистой олеиновой кислоты для приготовления «чистого» олеиновокислого натра, но для точных химических работ необходимо удалить остающиеся следы твердых кислот, что достигается превращением полученного продукта в хлороидистый препарат и кристаллизацией из органического растворителя. Твердые кислоты остаются в растворе, и олеиновая кислота может быть получена из хлороидистого препарата нагреванием с анилином¹».

Я хочу только добавить к этому, что олеиновокислый свинец или раствор его в эфире, пролитый нечаянно на руки и не смытый сейчас же, может вызвать тяжелое отравление свинцом.

КОЛЬЦА ДЛЯ ПУЗЫРЕЙ

Их можно изготовить из любой проволоки. Я пользовался луженой железной проволокой диаметром приблизительно в один миллиметр. Место соединения концов должно быть гладко спаяно без угол-

¹ Приготовление олеиновокислого натра из продажной олеиновой кислоты описано в книге А. Б. Млодзеевского «Демонстрации по молекулярной физике». — *Ред.*

щения. Если спаивание концов представляет затруднение, нужно взять по возможности тонкую проволоку, однако, настолько жесткую, чтобы она была способна поддерживать пузырь, и соединить ее концы, закрутив один около другого два или три раза. Удобны кольца от 5 до 8 сантиметров диаметром. Лучший материал для легких колец — это тонкая алюминиевая проволока диаметром с тонкую булавку (около $\frac{1}{2}$ миллиметра); так как алюминий спаять трудно, концы проволоки закручиваются один около другого. Если нет под рукой алюминия, можно взять очень тонкую, почти с волос толщиной (около $\frac{1}{5}$ миллиметра), медную проволоку или проволоку из другого металла. Прежде чем помещать на кольцо пузырь, кольцо необходимо смочить мыльным раствором, а после опытов хорошо вымыть и высушить.

НИТКИ И ПЕТЛИ В КОЛЬЦЕ

Эти опыты не представляют труда. Кольцо с свободно привязанной поперек ниткой погружается в мыльный раствор или же поверх кольца проводят куском бумаги, целлулоида или резины, обильно смоченными мыльным раствором. Смоченная мыльным раствором игла может служить для того, чтобы показать свободное передвижение нитки внутри пленки. Для разрывания пленки пригодна та же игла, слегка нагретая на пламени свечи, или кусок пропускной бумаги.

ЗАДУВАНИЕ СВЕЧИ МЫЛЬНЫМ ПУЗЫРЕМ

Для этого пузырь надо выдувать на расширенном конце короткой толстой трубки. Можно воспользоваться для этой цели обыкновенной стеклянной воронкой.

РАВНОВЕСИЕ ДВУХ МЫЛЬНЫХ ПУЗЫРЕЙ

Эти опыты лучше всего удаются в небольшом масштабе. Для составления прибора пригодны куски тонкой латунной трубки около сантиметра диаметром. Хорошо иметь особый приборчик, снабженный кранами для быстрого впуска или выпуска воздуха из пузырей и для того, чтобы приводить в сообщение два пузыря, когда это понадобится. Нетрудно осуществить этот опыт, пользуясь соединительными резиновыми трубками с зажимами вместо кранов¹. Здесь надо указать еще на одну подробность, от которой зависит успех или неудача опыта. Это применение стеклянного мундштука с тонко оттянутым концом, чтобы можно было точно регулировать впуск воздуха и не вдуть его случайно больше, чем это необходимо. Иначе представляется очень трудным ввести как раз необходимое количество воздуха в подобные маленькие пузыри. При уравнивании сферического и цилиндрического пузырей короткий кусок трубки, через которую вводится воздух, должен быть устроен таким образом, чтобы его легко было перемещать по отношению к неподвижному отрезку трубки такого же размера, закрытому с противоположного конца (рис. 23). Затем по обоим концам короткой трубки натягивается по мыльной пленке с помощью смоченного в мыльной воде куска бумаги или резины, но конец неподвижной трубки не должен быть затянут пленкой. Обе трубки должны находиться близко одна к другой, пока не образуется сферический пузырь. Тогда они постепенно раздвигаются все больше и больше, и внутрь их вдувается воздух так, чтобы стенки цилиндрического пузыря оставались прямыми, пока цилиндрический пузырь не станет достаточно длинным и не приблизится к пределу своей устойчивости. Тогда гораздо легче, чем в случае короткого цилиндра, по изменению его формы определить момент, когда давление сферического пузыря уравнивается давлением цилиндрического

¹ Можно выдувать пузыри на маленьких стеклянных воронках (диаметр 3—4 сантиметра), соединенных стеклянными трубками и кусками резиновой трубки с зажимами. — Ред.

пузыря. Если измерить тень пузырей или их изображение, полученное с помощью линзы на экране, можно будет установить, что шар обладает в точности двойным диаметром по сравнению с диаметром цилиндра.

ВОДЯНЫЕ КАПЛИ В ПАРАФИНОВОМ МАСЛЕ И СЕРОУГЛЕРОДЕ

Сюда относится все сказанное по поводу опыта Плато. Совершенно шарообразные и большие капли воды можно получить в смеси двух жидкостей, составленной таким образом, чтобы нижняя часть была чуть-чуть плотнее, а верхняя немного менее плотна, чем вода. Прибавление сероуглерода увеличивает плотность смеси. Сероуглерод — весьма огнеопасная жидкость, обладающая таким отвратительным запахом, что ее лучше не вносить в дом¹. Форму висящей капли и способ ее отрывания можно наблюдать при помощи воды и одного только парафинового масла, но опыт удастся лучше, когда к парафину прибавлен сероуглерод, вследствие чего вода падает в полученной смеси медленнее. Явление это удобно наблюдать с помощью открытой с обоих концов трубки в 1,5 или 2,5 сантиметра диаметром. Налив некоторое количество подкрашенной синей краской воды в стеклянный сосуд и покрыв ее слоем парафинового масла или парафиновой смеси сантиметров 6—10 толщиной, погрузить в воду стеклянную трубку, закрыв сначала верхнее отверстие большим пальцем или ладонью. По удалении руки вода устремится в трубку. Снова закройте верхнее отверстие, как прежде, и поднимите трубку, пока нижний конец ее не будет достаточно высоко над водой, оставаясь еще погруженным в парафин. Тогда в трубку очень медленно впускают воздух, едва-едва сдвигая палец с верхнего отверстия. Вода будет медленно вытекать, образуя большую нарастающую каплю, величина которой перед отрыванием будет зависеть от плотности жидкости и от размеров трубки.

Чтобы получить водяной цилиндр в парафине, нужно наполнить трубку водой, как прежде, но на этот

¹ В этом отношении удобнее нитробензол. — Ред.

раз следует верхний конец трубки оставить открытым. Затем, когда все успокоится, трубка быстрым движением в направлении ее длины вытаскивается прочь, и тогда увлеченная ею вода повиснет на несколько мгновений в парафине в форме цилиндра. Затем она будет разбиваться на отдельные шары и притом, если была взята широкая трубка, настолько медленно, что весь процесс можно наблюдать невооруженным глазом. Толщина слоя парафина должна как раз в десять раз превосходить диаметр трубки.

Для получения пузырей воды в парафине трубка погружается в воду с открытым все время верхним концом, так что трубка в большей своей части окажется наполненной парафином. Затем она на короткое время закрывается и поднимается, пока ее конец не окажется совершенно вне воды. Если теперь, осторожно поднимая трубку, медленно впускать в нее воздух, образуются водяные пузыри, наполненные парафином, которые можно отделить от трубки, как и мыльные пузыри, соответствующим резким боковым движением трубки.

Если в парафине внутри трубки плавают несколько водяных капель, а этого нетрудно достичь, тогда внутри полученных пузырей может оказаться несколько других капель или даже несколько других пузырей. Очень небольшое количество сероуглерода, впущенного осторожно по стенкам трубки, образует тяжелый слой на поверхности воды, на котором будут плавать эти сложные пузыри.

Цилиндрические пузыри воды в парафине можно получить, погружая трубку в воду и быстро вытаскивая ее оттуда, причем верхний конец ее все время остается открытым. Эти цилиндрические пузыри разбиваются затем на сферические пузыри совершенно так же, как жидкий цилиндр разбивается на шары жидкости. Как и прежде, удобнее ортотолуидин и вода или соленая вода, чем смесь — сероуглерод и вода¹.

¹ Удобнее не утяжелять воду примесью сероуглерода, но уменьшать разницу в плотностях двух жидкостей прибавлением к воде спирта (денатурата); смесь можно подкрашивать анилиновыми красками или чернилами. Хорошо получаются также капли чистой воды в вазелиновом масле. — *Ред.*

КАПЕЛЬКИ ЖИДКОСТИ НА ПАУТИННЫХ НИТЯХ

Их можно обнаружить на нитях паутины всех текущих паутины пауков. Хорошую паутину можно найти в изобилии на открытом воздухе осенью или же в оранжереях в течение почти целого года. Чтобы удобнее было рассматривать эти капельки, берется какое-либо плоское кольцо или кусок картона с отверстием. Поверхность кольца или картона смазывается небольшим количеством крепкого клея. Затем выбирается свежесработанная паутина, и через нее проводят кольцом или картоном так, чтобы некоторые нити ее, но не из центральной части, приклеились к кольцу и оказались натянутыми поперек отверстия. Шарики жидкости слишком малы, чтобы их можно было видеть простым глазом. Сильное увеличительное стекло или слабый микроскоп покажут нам эти капельки жидкости в их удивительной правильности. На паутине молодых пауков они расположены не с такой правильностью, как у вполне взрослых экземпляров.

Подобные красивые бисеринки легко видеть простым глазом на нитях паутины ранним осенним утром, ибо это не продукт гряда паука, а просто капельки росы. Они в совершенном виде воспроизводят шарообразную форму маленьких капель воды.

ФОТОГРАФИРОВАНИЕ ВОДЯНЫХ СТРУЙ

Фотографические снимки этого рода легко производятся по способу, описанному Чичестером Беллем. Вспышка света производится короткой искрой от нескольких лейденских банок. Фонтан или водяная струя должны находиться на расстоянии около полутора метров от искры, а водяная струя настолько возможно ближе к фотографической пластинке. Фотографический снимок тени струи получается при этих условиях настолько хорошим, что даже при рассматривании через сильную лупу изображение оказывается резким. Для этой цели годятся любые быстро действующие фотографические пластинки. Конечно, в комнате во

время установки пластинки и производства снимка должна быть полная темнота. Правильное разбивание струи на капельки может быть вызвано почти любым звуком. Прямая струя, изображенная на рис. 40 увеличенной в три или четыре раза, была разбита на правильные капельки путем простого свиста при помощи ключа. Разбивание струи фонтана на правильные капли было произведено путем прикрепления к выходной трубке деревянной палки, которая другим концом упиралась в подставку камертона. Звучание камертона поддерживалось при помощи электромагнитного прибора. Можно воспользоваться, хотя это и не так удобно, обыкновенным камертоном, который во время звучания должен касаться деревянной поддержки трубки фонтана.

Струя лучше всего разбивается при определенных нотах, но она может быть настроена и на более широкий диапазон изменением величины отверстия или давления воды, или того и другого вместе.

ФОНТАН И ПАЛОЧКА СУРГУЧА

Почти невозможно обойти молчанием этот поразительный и все-таки простой опыт. Фонтан почти любого размера, с диаметром гладкой части от двух до шести миллиметров и около двух метров высотой, перестает разбиваться на ряд капель, когда на расстоянии около метра от него держат потертую фланелью палочку сургуча. Подходящий размер фонтана — это около одного с небольшим метра высоты с отверстием около одного миллиметра диаметром.

Выходная трубка должна быть поставлена таким образом, чтобы фонтан падал слегка наклонно. Сургуч электризуется трением о рукав, кусок меха или сухую фланель. Тогда он приобретает способность притягивать кусочки бумаги и пробки, но он продолжает еще действовать на фонтан, когда прекращается всякое видимое воздействие на кусочки бумаги и даже на чувствительные золотые листочки электроскопа.

ОТСКАКИВАНИЕ ВОДЯНЫХ СТРУЙ ДРУГ ОТ ДРУГА

Этот красивый эксперимент требует небольшого упражнения для получения удовлетворительных результатов. Берется стеклянная трубка с просветом с гусиное перо и очень слабо растягивается (см. заметку о тонких трубках и капиллярности), так чтобы получилась шейка в три миллиметра диаметром в наиболее узкой части. Трубка разламывается как раз в этой части после того, как здесь производится царапина напильником. Каждая из полученных трубок при помощи резиновой трубки или иначе соединяется с резервуаром воды, и резиновые трубки сдавливаются винтовыми зажимами, пока не получатся две совершенно одинаковые водяные струи. Обе выходные трубки направляются таким образом, чтобы струи касались своими гладкими частями под очень малым углом. Тогда они в течение короткого времени будут отскакивать друг от друга не сливаясь. Если в воздухе много пыли, если вода не чиста или если вдоль трубки увлекаются пузырьки воздуха, тогда обе струи сливаются одна с другой сразу. При установке, которой я пользовался для проектирования на экране, обе трубки были почти горизонтальны, одна располагалась выше другой на один сантиметр, и обе они были едва-едва сходящимися. В своих положениях они были закреплены с помощью сургуча. Резиновыми трубками эти выходные трубки соединялись с резервуарами воды, расположенными сантиметров на пятнадцать выше, и винтовые зажимы служили для регулирования притока воды. Один из сосудов с водой был установлен на трех кусках сургуча, чтобы изолировать его в электрическом отношении, и соответственная выводная трубка поддерживалась исключительно сургучом. Вода в сосудах была предварительно профильтрована и в одном из них окрашена в синий цвет. При этих предосторожностях струи остаются отдельными довольно продолжительное время, но сразу же сливаются, если на расстоянии около двух метров от них поместить палочку наэлектризованного сургуча. Их можно снова разделить, вводя палец в воду близ одного из отверстий и отклоняя соответствующую струю; по

удалении пальца струи начинают снова отскакивать одна от другой, как прежде. Это слияние и разделение могут чередоваться до десяти или двенадцати раз в минуту.

ФОНТАН В ПЕРЕМЕЖАЮЩЕМСЯ СВЕТЕ

Это явление с успехом может быть показано большому количеству людей сразу, если пользоваться электрическим дуговым светом. Но прибегать к этому свету нет необходимости, если показывать эволюцию капли каждому зрителю отдельно. Тогда нужно только поместить бьющий фонтан на ярком фоне, таком, например, как небо, разбить струю на капли при помощи камертона или другим музыкальным звуком, как было описано, и затем смотреть на него через картонный диск, разделенный на равных расстояниях у его края на участки в 5—8 сантиметров ширины, с отверстиями между каждой парой участков диаметром в одну треть сантиметра. Вполне подходящим является картонный круг в 12 сантиметров диаметром с шестью равноотстоящими отверстиями, удаленными на 1,5 сантиметра от края. Диск приводится тем или иным способом во вполне правильное вращательное движение с такой скоростью, что камертон или натянутая струна, если пользуются ею, кажутся во время колебаний неподвижными или почти неподвижными, если на них смотреть через отверстие. Тогда можно будет видеть отдельные капли и вообще все, что описано на предыдущих страницах, но, кроме того, станет ясным еще и многое другое.

Это один из самых интересных опытов, и стоит потрудиться, чтобы добиться успеха. Картонный диск удобнее всего приводить во вращение при помощи маленького электродвигателя, питающегося током от нескольких аккумуляторов.

Скорость хода регулируется таким образом, чтобы она немного превышала необходимую; тогда желательную скорость легко получить слабым давлением пальца на конец оси.

ПОЮЩАЯ ВОДЯНАЯ СТРУЯ

Для этих опытов нужно сделать очень маленькое отверстие, в одну треть миллиметра диаметром. Для получения его Белль держал конец стеклянной трубки диаметром с гусиное перо в пламени паяльной трубки и все время вращал его, пока он почти совершенно не заправился. Затем он внезапно и с силой дунул в трубку¹. Из нескольких изготовленных таким образом трубок, наверное, хоть одна окажется пригодной. Рэлей обыкновенно готовил трубочки, прикрепляя к концу стеклянной или металлической трубки кусочек тонкого листка металла, в котором проделано отверстие требуемой величины, например кусочек свинца с отверстием, сделанным сломанной иглой. Для получения надлежащего давления воды резервуар поднимают на высоту около четырех с половиной метров. Вода должна быть совершенно чиста и свободна от пыли и пузырьков воздуха. Этого можно достичь, пропуская ее через трубку, набитую фланелью, ватой или каким-либо иным фильтровальным материалом. Между фильтром и выводной трубкой должна находиться хорошая черная каучуковая трубка с внутренним диаметром около одной трети сантиметра и длиной около одного метра. Лучше брать воду не прямо от водопровода, а из резервуара, расположенного на высоте четырех с половиной метров. Если нет подходящей цистерны, можно просто воспользоваться ведром, поставленным сверху лестницы, с трубкой, доходящей донизу. Это имеет то преимущество, что высоту резервуара над выходным отверстием в случае надобности легко регулировать.

Устройство остальных частей аппарата очень просто. Нужно только натянуть и привязать вокруг конца трубки, около полутора сантиметров диаметром, кусок тонкой резиновой перепонки. Трубка, стеклянная или металлическая, может быть или укреплена на тяжелой подставке, тогда к ней может быть при-

¹ Можно пользоваться и трубкой с тонко оттянутым концом. — Ред.

соединена боковая трубка, или же она может быть открыта с обоих концов и удерживаться зажимом. Полезно приставить к открытому концу картонный рупор (рис. 46), если необходимо усилить звук, чтобы его могли одновременно слышать много людей. Сам же экспериментатор, чтобы улавливать слабые звуки, может провести от открытого конца к своему уху гладкую резиновую трубку в один или полтора сантиметра диаметром. При этом такие звуки, как тиканье часов, могут достигать оглушительной силы.

ПУЗЫРИ И ЭФИР

Эти опыты также нужно производить с большой осторожностью, потому что эфир, подобно сероуглероду, легко воспламеняется. Бутылку с эфиром никогда не следует подносить близко к огню. Если пролить большое количество эфира, то тяжелые пары могут потечь по полу и достичь огня даже на другом конце комнаты. Наполнить сосуд парами эфира можно, наливая его на кусок пропускной бумаги, лежащий на уровне края сосуда. Для сосуда в четырех-пять литров требуется очень небольшое количество эфира, примерно половина винного стакана. При неспокойном воздухе пары рассеиваются очень быстро. Пустить пузырь плавать на поверхности тяжелого пара нетрудно. Через пять или десять секунд его можно удалить при помощи маленького легкого кольца с рукояткой, причем кольцо должно быть предварительно смочено мыльным раствором, но на нем не должно быть мыльной пленки. Если поднести такой пузырь к пламени, поставленному на близком расстоянии, он сразу вспыхнет. Если пламя свечи находится достаточно высоко над сосудом с эфиром, то без особого риска свечу можно ставить и не далеко от сосуда. Чтобы показать горение пара эфира, можно воспользоваться той же широкой трубкой или воронкой, которая применялась для задувания свечи мыльным пузырем. Грушевидная форма отягченного парами эфира пузыря после десяти- или пят-

118

надцатисекундного пребывания его в эфире хорошо видна по удалении пузыря с поверхности пара эфира, но, чтобы заметить вытекающий из него пар, нужно при помощи сильного источника света отбросить тень его на экран.

ОПЫТЫ С ВНУТРЕННИМИ ПУЗЫРЯМИ

При этих опытах наряду с хорошим раствором важнейшее значение имеет трубка. Обыкновенная трубка для этой цели не пригодна. В качестве мунштука подходящей будет стеклянная трубка около 8 миллиметров диаметром. Если пользоваться только такой трубкой, согнутой близ конца под прямым углом, то накапливающаяся влага будет время от времени стекать на пузырь, который, конечно, будет лопаться. Сам я изготовил для себя трубку, изображенную на рис. 71 в половину своей величины, и я не думаю, чтобы ее можно было еще усовершенствовать. Кто не умеет выдувать из стекла необходимые приборы, тот может сделать себе подобную трубку с помощью пробок, как показано на рис. 72. Она тоже хороша, но не так красива и удобна.

При столкновении двух пузырей, чтобы показать, что между ними нет действительного касания, надо избегать соприкосновения одного пузыря с кольцом, или висящей каплей жидкости, или вообще с какой-нибудь выступающей частью другого, что может разрушить оба пузыря. Сила удара имеет предел, который укажет нам собственный опыт.

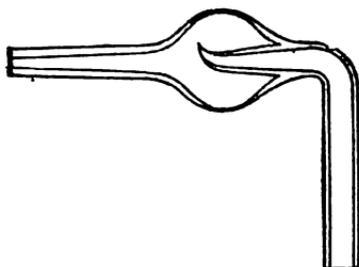


Рис 71.

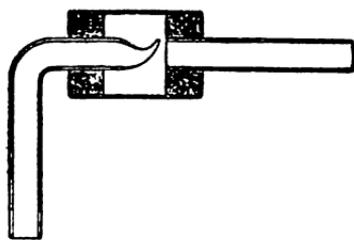


Рис. 72.

При продавливании пузыря сквозь кольцо, меньшее чем он сам, с помощью натянутой на другое кольцо мыльной пленки важно, чтобы пузырь был не слишком велик, хотя величина его все же может превысить наши ожидания. Заставить пузырь перейти вверх уже труднее из-за висящей внизу его капельки жидкости, которую не так легко удалить совершенно.

Чтобы выдуть один пузырь внутри другого, сначала нужно выдуть на нижней стороне горизонтального кольца пузырь величиной с апельсин. Затем к этому пузырю надо подвесить легкое проволочное кольцо, чтобы слегка изменить его форму. Для этой цели алюминиевые кольца слишком легки, поэтому нужно или взять кольцо из более тяжелого металла, или к рукоятке кольца прикрепить маленький груз. Кольцо должно быть настолько тяжелым, чтобы стороны пузыря составляли тридцать или сорок градусов с вертикальной линией, где они встречаются кольцо, как показано на рис. 54. Смоченный конец трубки вводится внутрь через вершину пузыря, пока он не проникнет приблизительно на полтора сантиметра. Теперь внутри можно выдуть другой пузырь любого желаемого размера. При вынимании трубки медленное движение может испортить все дело, потому что оно будет приподнимать внутренний пузырь, пока он не встретится с наружным пузырем в одном и том же месте трубки. Это приведет пузыри в действительное соприкосновение. С другой стороны, резкое движение почти наверное вызовет слишком сильное нарушение равновесия. Быстрое и короткое движение — вот и все, что требуется. Рекомендуется, прежде чем пропускать трубку через нижнее кольцо, чтобы коснуться внутреннего пузыря и убрать с него тяжелую каплю, придержать кольцо другой рукой. Излишняя жидкость стекает тогда с обеих пузырей одновременно. При этом надо позаботиться, чтобы внутренний пузырь не касался кольца, а кроме того, чтобы трубка не проходила через ту область пузырей, где они очень близко подходят друг к другу. Чтобы удалить нижнее кольцо, нужно несколько оттянуть его, а затем слегка наклонить. Тогда оно начнет отделяться более легко, но в этот момент надо приподнять кольцо, чтобы его

отделение не произошло слишком быстро, иначе последний толчок, когда пузырь покидает нижнее кольцо, может оказаться слишком сильным и пузыри не в состоянии будут ему противостоять.

Пузыри, окрашенные флуоресцеином или уранином, не обнаруживают своей великолепной флуоресценции, пока на них не будет сконцентрирован солнечный или электрический свет при помощи линзы или зеркала. Количество необходимой краски так ничтожно, что мы всегда рискуем взять больше, чем нужно. Приблизительно, краски, взятой на кончике перочинного ножа в одну треть сантиметра длиной, достаточно для винного стакана мыльного раствора. Если взять слишком много краски, флуоресценция ослабевает и очень быстро исчезает совершенно. Наилучшее количество можно найти в несколько минут путем опыта.

Для выдувания мыльных пузырей, содержащих светильный газ, или воздух, или смесь того и другого, удобнее всего взять Т-образную трубку, один из коротких концов которой при помощи резиновой трубки соединяется с трубкой для выдувания мыльных пузырей, длинное вертикальное колено соединяется с длинной резиновой трубкой с внутренним диаметром в одну треть сантиметра, доходящей до пола; дальше она тем или иным способом может быть присоединена к газопроводной трубке. Приостанавливать струю газа можно или зажиманием резиновой трубки левой рукой, если она свободна, или наступая на нее ногой, если обе руки заняты. Тем временем воздух вдвигается через короткое колено, которое может быть закрыто языком, если необходим впуск одного только газа. Этот конец трубки должен быть расширен в горячем виде при помощи быстрого вдвигания в нее ненасеченного конца холодного напильника и одновременного поворачивания его. Это нужно для того, чтобы легче было держать трубку зубами, не опасаясь выскользывания ее.

Если нельзя достать легкой Т-образной трубки или достаточно длинной трубки, тогда нужно вынуть трубку для выдувания пузырей изо рта и надеть на нее резиновую трубку, когда понадобится заменить воздух газом. Это делает манипуляции более трудны-

ми, но таким образом могут быть произведены все опыты, за исключением опыта с тремя пузырями.

Во всех случаях для выдувания внутреннего пузыря трубку надо подвести к высшей точке внешнего пузыря. Если ее вводить горизонтально через боковую стенку, тогда внутренний пузырь наверное лопнет. Если внутренний пузырь будет выдуваться газом, то он скоро обнаружит стремление подниматься. Тогда трубку нужно наклонить таким образом, чтобы внутренний пузырь не мог взползти по ней и коснуться внешнего пузыря в месте вхождения трубки.

Внутренний пузырь после раздувания можно оставить в покое у вершины внешнего пузыря. Если желательно, после того как трубка была вынута, ввести еще воздух или газ во внутренний или внешний пузырь, то не рекомендуется, снова введя трубку, сразу приступить к дутью; пленка, которая при введении трубки образуется на ее конце, вероятно, превратится в третий пузырь, и он при данных обстоятельствах почти наверное помешает опыту. Быстрое и короткое всасывание втягивает эту пленку в трубку и разрывает ее, а тогда можно без всякого риска вдуть воздух или газ.

Если этот опыт производится на легком кольце, к которому привязываются нитка и бумага, левая рука будет занята поддерживанием этого кольца, а тогда впуск газа нужно регулировать ногой или попросить об этом помощника. Легкое кольцо должно иметь около пяти сантиметров в диаметре. Когда внутренний пузырь начинает поднимать кольцо, можно, держа в руке бумагу, осторожным толчком заставить оба пузыря покинуть кольцо и подняться в воздух, причем один будет внутри другого. Для этой цели бумагу надо привязать к самому маленькому кольцу. С кольцом более крупных размеров того же результата можно достичь, наклоня кольцо и таким образом позволяя внешнему пузырю отделяться или помещая отверстие трубки у кольца и выдувая третий пузырь в действительном соприкосновении с кольцом и с наружным пузырем. Это облегчает процесс освобождения пузырей.

Выдуть три пузыря так, чтобы один находился

внутри двух других, уже более трудно. Следующий способ представляется мне довольно надежным. Сначала выдувается на кольце пузырь величиной с большой апельсин. Затем берется маленькое кольцо сантиметра в три диаметром, с прямой проволокой в виде рукоятки, отходящей вниз от одного края, и после смачивания в растворе осторожно вводится через неподвижное кольцо так, чтобы малое кольцо оказалось внутри пузыря. Теперь во внешний пузырь, или пузырь № 1, вводят трубку, свежесмоченную раствором, пока она не окажется как раз у малого кольца, и начинают выдувать пузырь № 2. Это надо делать, приблизив трубку почти вплотную к внутреннему кольцу, так как пленка на этом кольце разрушила бы пузырь по достижении им известной величины. Трубка вынимается, снова погружается в жидкость и вводится во внутренний пузырь, причем принимаются предосторожности, чтобы два пузыря не соприкоснулись где-нибудь друг с другом. Затем выдувается большой газовый пузырь, который может касаться вершины № 2, в то время как он увеличивается в размерах. № 2 в свою очередь может без вреда для всего сооружения покоиться у вершины № 1. Трубку удаляют осторожными движениями вниз из № 3, не выпуская одновременно газа, а затем вводится немного газа в № 2, чтобы сделать его легче и в то же время уменьшить давление между № 2 и № 3. Теперь малое кольцо может быть отделено от № 2 и удалено совершенно. Но если выполнение этой операции представит затруднение, тогда трубка вынимается из № 2 и в № 1 вдувается воздух для увеличения его, что облегчит этот процесс. После этого трубка удаляется из № 1. Теперь у нас получатся три пузыря, один внутри другого. При выдувании неподвижного кольца четвертого пузыря, как было описано выше, пузырь № 1 освобождается, и все три пузыря летят вверх. Во время отделения пузырь № 1 можно перенести на легкое свободное кольцо, к которому привязан кусок бумаги, и т. д. Наше описание кажется очень сложным, но небольшое упражнение покажет, что все эти опыты не так уж трудны.

ПУЗЫРИ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Эти опыты оказываются самыми трудными из всех. Укажем на следующие подробности для предупреждения неудачи. К одному из концов пары проволок, около пятнадцати сантиметров длиной в прямой части, приделывается по кольцу. На расстоянии трех сантиметров с противоположной от колец стороны проволоки сгибаются под прямым углом. Эти концы вставляются в два отверстия, просверленные вертикально в каком-нибудь непроводнике, как эбонит, на расстоянии 5 или 10 сантиметров друг от друга. Благодаря такому устройству оба кольца получаются горизонтальными на одном уровне и могут быть сближены или раздвинуты. Раздвинем их на несколько сантиметров и выдую над или под каждым по пузырью, стараясь придать им почти одинаковые размеры. Затем будем сближать кольца до того момента, когда пузырьи как раз лишь коснутся друг друга. Хотя их можно ударять друг о друга и они не будут соединяться, все же они не будут долго оставаться в этом положении, так как выпуклые поверхности могут легко выдавить разделяющий их воздух. Эбонит не должен быть совершенно сухим и теплым, потому что тогда он, наверное, будет наэлектризован, а это помешает опыту. Его, однако, нельзя смачивать, потому что он станет тогда проводником, и палочка сургуча не произведет никакого действия. Если его применяли в качестве подставки для колец в некоторых предыдущих опытах, то он, вероятно, покрыт брызгами от лопавшихся пузырей и не может быть в хорошем состоянии.

Под рукой наготове должен быть кусок сургуча, завернутый в один или два слоя сухой фланели или меха. Если сургуч наэлектризован очень сильно, он окажется слишком мощным и при поднесении к пузырьям заставит их разрушить друг друга. Достаточно слабой электризации, тогда, в тот момент, когда будем приближать сургуч к пузырьям, пузырьи сольются. Сургуч можно так близко поднести к пузырью, внутри которого находится другой, что они будут оттягиваться в сторону, но при этом внутренний пузырь

будет защищен от действия электричества внешним пузырем, как экраном. Не следует подносить сургуч очень близко, так как в этом случае пузырь может притянуться настолько сильно, что коснется палочки и лопнет. Смачивание сургуча делает последующую электризацию его весьма ненадежной. При этом опыте не следует удалять висящие капли у обеих пузырей, так как их вес, повидимому, придает пузырям большую устойчивость; с наружного пузыря капля может быть удалена, и, если он не слишком велик, процесс электрического слияния внешних пузырей без повреждения внутреннего может быть повторен много раз. Мне удалось однажды соединить друг за другом восемь или девять отдельных пузырей с одним и тем же внешним пузырем одной из пар, пока последний не стал настолько малоподвижным, что дальнейшее соединение стало невозможным.

Указания относительно обращения с фонарями выходят за пределы моей задачи. Замечу только, что в то время, как малые пузыри удобно проектировать на экран с помощью линзы, от больших пузырей, описанных в последней беседе, может быть лишь отброшена тень. При этом конденсирующие стекла удаляются и пользуются одним только источником света. Вольтову дугу следует предпочесть другим источникам, так как тени получаются при ней более резкими и окраска пузырей более яркой. Обыкновенная лампа, даже большой силы, не годится, так как не дает резких теней.

Эти указания, я надеюсь, будут полезны для тех, у кого нет достаточного навыка и кто хотел бы воспроизвести эти опыты для собственного удовольствия. Как ни излишни покажутся, может быть, вам эти подробности, однако, несмотря на мои старания предусмотреть все возможные трудности, вам не раз придется пожалеть, что этих подробностей слишком мало.

СОДЕРЖАНИЕ

Из предисловия автора к первому изданию	3
---	---

МЫЛЬНЫЕ ПУЗЫРИ И ОБРАЗУЮЩИЕ ИХ СИЛЫ

Введение	5
Упругая перепонка на поверхности жидкости	7
Капиллярные поднятия и понижения	14
Капиллярное притяжение и отталкивание	20
Капиллярность различных жидкостей	23
Почему утихают волны под действием масла?	27
Капли жидкости	29
Мыльные пленки, их натяжение и кривизна	36
Жидкие цилиндры и струи	47
Водяной микрофон	64
Мыльные пленки на проволочных рамках	67
Мыльные пузыри и эфир	70
Опыты с мыльными пузырями	72
Пузыри и электричество	78
Мыльный пузырь	80
Пузыри не из мыльной воды	84
Сложные пузыри	89
Мыльные пузыри под открытым небом	94

ПРАКТИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Большая капля в резиновой перепонке	101
Выскакивающий поплавоч	101
Парафинированное сито	102
Тонкие трубки и капиллярность	103
Капиллярное поднятие воды между двумя пластинками	104

Слезы вина	104
Шарики жидкости	104
Опыт Плато	105
Другие жидкости	106
Хорошая смесь для мыльных пузырей	106
Кольца для пузырей	108
Нитки и петли в кольце	109
Задувание свечи мыльным пузырем	109
Равновесие двух мыльных пузырей	110
Водяные капли в парафиновом масле и сероуглероде	111
Капельки жидкости на паутинных нитях	113
Фотографирование водяных струй	113
Фонтан и палочка сургуча	114
Отскакивание водяных струй друг от друга	115
Фонтан в перемежающемся свете	116
Поющая водяная струя	117
Пузыри и эфир	118
Опыты с внутренними пузырями	119
Пузыри и электричество	124

ДЛЯ НЕПОЛНОЙ СРЕДНЕЙ
и СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

Ответственный редактор *А. Абрамов*
Научный ред. проф. *А. Млодзевский*
Художественный редактор *И. Иванов*
Технический редактор *Г. Левина*
Ответств. корректора: *С. Либова* и
А. Хлебодарова

Сдано в производство 5 V 1937 г.
Подписано к печати 9/X 1937 г.
Формат бумаги 84×108¹/₂. 8 печ. л.
(6,4 уч.-авт. л.)

Дегиздат № 1242. Индекс Д-9
Уполномоченный Главлита Б-29480
Тираж 65 000 экз. Заказ № 1650

Набрано и сматрицировано в 17 тип.
Огиза РСФСР треста „Полиграф-
книга“. Москва.

Отпечатано на Фабрике детской книги
Издательства детской литературы
ЦК ВЛКСМ.

Москва, Сушевский вал, 49.

Цена 1 р. 50 к.