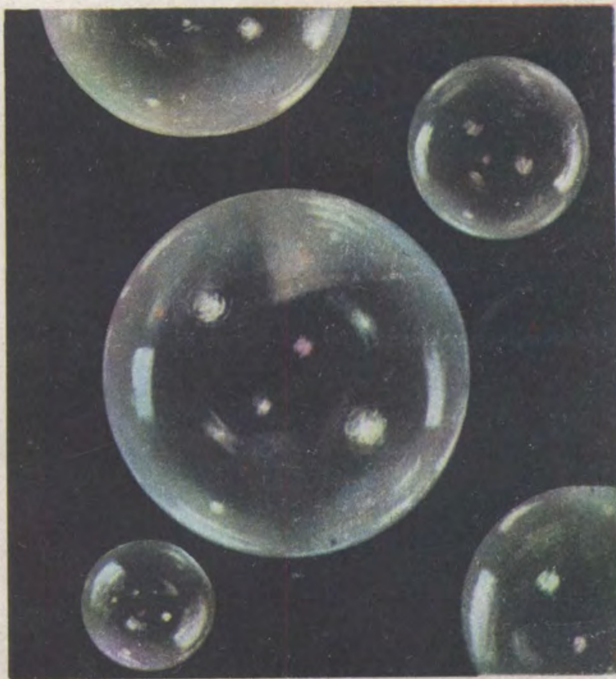
БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»
выпуск 46

Я. Е. ГЕГУЗИН

ПУЗЫРИ



БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»
ВЫПУСК 46

Я. Е. ГЕГУЗИН

ПУЗЫРИ

МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1985

ББК 22.36
Г27
УДК 539.1(023)

Гегузин Я. Е.

Г27 Пузыри.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.— 176 с.— (Библиотечка «Квант». Вып. 46.)

30 коп. 110 000 экз.

Научно-популярный рассказ о некоторых физических свойствах мыльных пузырей и пузырей в жидкости и о тех физических явлениях, в которых пузыри принимают участие. Рассказано о взаимодействии между мыльными пузырями, о возможности их использовать для создания модели реального кристалла, об участии пузырей в «дыхании» воды, о том, какую роль они играют во многих технологических процессах и в создании новых методов физических исследований.

Для школьников старших классов, преподавателей и лиц, интересующихся современным естествознанием.

Г $\frac{1704060000-115}{053(02)-85}$ 184-85

ББК 22.36
530.3

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЮ

Эта книга посвящена пузырям. И тем, которые образованы тонкой мыльной пленкой, и тем, которые расположены в жидкости. Это явно разные объекты, и все же для них характерно много общих черт, и я надеюсь, что два различных типа пузырей будут естественно соседствовать под общим переплетом.

Читатель, видимо, хотел бы узнать, почему автор решил рассказать о пузырях в популярной книге. Готов ответить. Тому есть две причины.

Во-первых, как выясняется, пузырек оказывается главным участником очень важных технологических процессов и физических явлений. Эти процессы могут быть организованы лучшим образом, а явления использованы с наибольшим успехом, если будут поняты физические закономерности, управляющие поведением пузырей.

Речь идет о флотации, процессе, при котором руда освобождается от пустой породы, о кавитации — процессе появления несплошностей в жидкости вследствие местного понижения давления (эти несплошности превращаются в пузырьки, которые, схлопываясь, могут изъязвлять и разрушать металл, находящийся в жидкости, в частности гребные винты кораблей), о барботаже — продувании сквозь жидкость газовых пузырьков (их поток приводит к совершенному перемешиванию жидкости, а иной раз используется для ее равномерного прогрева), о таких будничных явлениях, как «дыхание» жидкости и ее кипение, об огромных пузырьковых камерах, с помощью которых в лабораториях обнаруживаются быстро летящие частицы, родившиеся в различных ядерных реакциях, и о многом ином.

Во-вторых, я это сделал, ведомый желанием и надеждой поделиться с читателями тем чувством радости, которое мне доставляют созерцание природы и попытки понять, как общие законы физики себя обнаруживают в конкретных, иной раз неожиданных явлениях: в отрыве капли от сосульки, в колебаниях листьев кроны дерева, обдуваемого ветром, во всплывании газового пузырька в воде, в павлиньей раскраске мыльного пузыря, в бликах лунной дорожки на поверхности ночной реки.

А пузырь — это, по-моему, очень интересно и изумительно красиво. У Марка Твена есть такая восторженная фраза: «Мыльный пузырь, пожалуй, самое восхитительное и самое изысканное явление природы». Я не четко понимаю, что означают слова «изысканное явление», но отчетливо вижу, что Твен упивается созерцанием мыльного пузыря.

Хочется, чтобы стоящая предо мной цель — поделиться с читателем радостью созерцания и познания — была достигнута, чтобы читатель испытал чувство радости, побывав в том уголке природы, который именуется «пузыри». Это чувство — очень доброе и очень надежное начало последующего изучения природы.

Автор надеется, что на вопрос читателя ответ дан. Теперь дело за книгой.

В конце обращения я считаю необходимым поблагодарить А. И. Быховского, А. С. Дзюбу, Ю. С. Кагановского, В. С. Кружанова, А. И. Песина и Л. С. Швиндлермана за многочисленные обсуждения текста книги и В. В. Богданова за помощь, оказанную при ее оформлении. Искренне благодарен также профессору Л. Г. Асламазову. Его строгая критика в сочетании с деликатной требовательностью помогли мне при окончательной подготовке рукописи к печати.

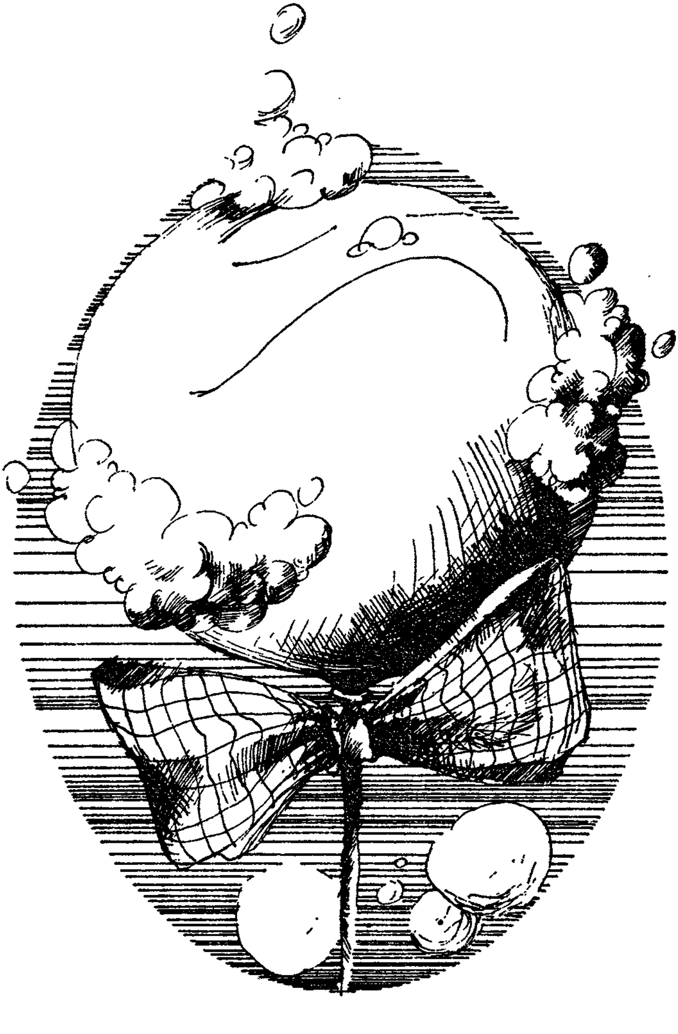
Автор

ГЛАВА 1

МЫЛЬНЫЕ ПУЗЫРИ

В нем столько блеску было,
Была такая спесь,
А он – воды и мыла
Раздувшаяся смесь.

Самуил Маршак. «Мыльные пузыри»



Собираясь писать о мыльных пузырях, нельзя не вспомнить о вышедшей 100 лет тому назад популярной книге Чарльза Бойса «Мыльные пузыри» и не задуматься над тем, в чем секрет ее долголетия. А еще и над тем, что, быть может, после Бойса и писать о мыльных пузырях не следует.

Думается, что прелесть книги Бойса – в безыскусном единении элементов игры и науки. Ее читатели – им, скажем, 14–16 лет – живут в пограничной полосе между детством и юностью. Они еще не совсем утратили потребность поиграть во что-нибудь увлекательное, пообщаться с чем-нибудь удивляющим. Самые счастливые и талантливые из них сохраняют эту потребность на всю жизнь. Из них-то и получаются настоящие ученые, которым доступны свершения. Мыльный пузырь – великолепный объект для игры: красивый, экзотический, легко доступный и неисчерпаемый. И книга о нем, безусловно, желанна.

Не станем искать недостатки в книге Бойса. Известно, что лучше любого рецензента книгу судит время, имея в своем арсенале такую кару, как забвение. Не громкое поругание, а молчаливое забвение. «Мыльные пузыри» Бойса выдержали испытание временем.

А теперь – о том, следует или не следует после Бойса писать о мыльных пузырях. По-моему, следует, и, во всяком случае, можно писать. В частности, на это дают право прошедшие 100 лет: появились новые знания о пузырях, изменился читатель. И еще одна причина: другая книга – другой автор, а это значит – немного другая формулировка знаний, несколько иной круг интересов.

Очень многие помнят и любят веселое ироничное стихотворение С. Я. Маршака «Мыльные пузыри», строки из которого взяты в качестве эпиграфа к этой главе. Потому и помнят, что любят – за легкость, яркость и многоцветность стиха, которые сродни легкости и многоцветности мыльного пузыря, отсвечивающего и синевой моря, и огнем пожара. Маршак утверждал, что пузырь без всяких оснований хвалится, что родился из морской пены, когда в действительности, он просто-напросто раздувшаяся смесь воды и мыла. Так, шутя, судит о мыльном пузыре поэт.

А вот великий английский физик лорд Кельвин, за которым числятся многие фундаментальные достижения в науке, к мыльному пузырю относился много почтительнее. В одной из своих лекций он говорил: «Выдуйте мыльный пузырь и смотрите на него. Вы можете заниматься всю жизнь его изучением, не переставая извлекать из него уроки физики».

Итак, воздадим должное Бойсу, порадуемся веселым стихам Маршака и последуем доброму совету Кельвина.

Воды и мыла раздувшаяся смесь

Мыльный пузырь – конструкция очень устойчивая. Если помнить о том, что его строительным материалом является главным образом вода, – устойчивость мыльного пузыря не может не поражать.

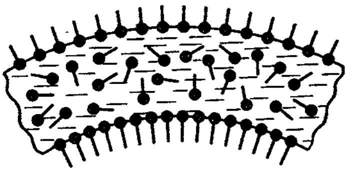
Что же придает такую устойчивость пузырю, изготовленному из тончайшей жидкой пленки? Предельная простота и совершенство формы? Очевидно, и это! Так называемые «архитектурные излишества», если они действительно «излишества», совершенствованию и надежности конструкции обычно не способствуют. А проще, величественнее и совершеннее формы чем сфера, нет! Но дело явно не только в форме: из чистой воды устойчивый пузырь не получается, а из воды с добавкой мыла формируется тонкий, устойчивый, разноцветный пузырь.

В этом очерке мы обсудим роль малой добавки мыла к воде, делающей ее пригодной для построения устойчивого пузыря. Мы, разумеется, ничего придумывать и изобретать не станем. Фундамент нашего очерка составляют идеи, откровения и эксперименты, связанные с именами великих физиков – Гиббса, Рэлея, Ленгмюра. Мы постараемся осмыслить то, что обрело ясность благодаря проницательности великих.

Начнем с азов. Прямым следствием самых общих законов природы оказывается явление адсорбции. Оно заключается в том, что на поверхности и твердых тел, и жидкостей охотно располагаются (адсорбируются) те «чужие», «примесные», поверхностно-активные молекулы, которые способны понижать поверхностную энергию. О поверхностной энергии – чуть позже, а здесь – о том, откуда приходят молекулы, адсорбирующиеся на поверхности твердого тела и жидкости. Во-первых, – из объема вещества, если они там имеются в виде случайно попавшей или преднамеренно введенной примеси. Адсорбирующиеся молекулы могут осесть на поверхности из окружающей газовой среды. Учение об адсорбции – очень значительный раздел физической химии. Мы же довольствуемся той скупой информацией об адсорбции, которая содержится в нескольких предыдущих фразах.

Существует огромный класс веществ – так называемые поверхностно-активные вещества, или сокращенно ПАВ, молекулы которых легко и охотно адсорбируются на поверхности жидкости. Такими веществами, в частности, богаты мыла́.

Молекула ПАВ – это удлиненная цепочка, состоящая из многих атомов водорода и углерода. Такая молекула-цепочка обладает одной очень важной особенностью – концы ее имеют различную структуру и по-разному относятся к соседству с водой: один конец охотно соединяется с водой, а противоположный инертен по отношению к воде. Именно поэтому молекулы мыла на поверхности воды должны выстроиться так, чтобы с водой соприкасались лишь те концы, которые испытывают к ней сродство. Быть может, нагляднее будет образ не цепочки, а спички. Одним концом, допустим головкой, молекулы охотно пристраиваются к воде, образуя на ее поверхности двумерный «частокол». Прямыми измерениями было установлено, что адсорбция мыла на поверхности воды понижает ее поверхностное натяжение в два с половиной раза: от $7 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Дж/м^2. Разность двух этих значений является мерой того, насколько охотно формируется частокол из молекул мыла на поверхности воды, т. е. насколько в нашем случае энергетически целесообразна адсорбция.



Так схематически выглядит строение мыльной пленки, укрепленной поверхностно-активными молекулами мыла

Вода, налитая в стакан, имеет одну свободную поверхность и на ней может образоваться один слой молекул мыла, один двумерный частокол молекул-спичек. А свободная пленка имеет две поверхности и, следовательно, на ней может сформироваться два частокола удлиненных молекул мыла. Такая водяная пленка, обрамленная и укрепленная молекулами мыла, и является строительным материалом, из которого сконструирован и построен мыльный пузырь.

Интуиции нелегко примириться с тем, что водяная пленка, поверхностная энергия которой понижена вследствие адсорбции молекул мыла, оказывается более прочной, устойчивой. А вот оказывается! В данном случае проявляет себя не понижение поверхностной энергии, а формирование эластичного, армирующего пленку частокола упорядоченно расположенных молекул. Оказывается, раздувшаяся смесь — не смесь, а упорядоченная трехслойная структура из воды и молекул ПАВ, способная раздуваться. Вряд ли на это была бы способна совершенно неупорядоченная смесь. Из капли мутной мыльной воды, лишенной права на эффект адсорбции, нельзя создать пузырь.

У читателя должно возникнуть множество вопросов. Видимо, нужно знать, на чем основано представление о том, что действительно образуется частокол молекул-спичек, а если образуется, то как скоро молекулы мыла, плавающие в объеме воды, выходят на ее поверхность, чтобы принять участие в образовании частокола. А еще надо знать, что делается с пленкой и с частоколом молекул на ней, когда ее растягивают или раздувают пузырь, созданный из пленки.

На перечисленные вопросы можно бы ответить, ссылаясь на новейшие исследования, выполненные в современных лабораториях с использованием новейшего оборудования. Можно бы, но мы воспользуемся результатами исследований почти вековой давности, выполненных великим английским физиком Рэлеем. Их главное отличие от многих иных исследований состоит в том, что основаны они на великолепной выдумке экспериментатора, который в силу разных обстоятельств не обременен сложным, мудреным оборудованием. Оборудование, разумеется, заслуживает всяческой почтительности, и современная физика без него немыслима, и все же истинную радость общения с искусством и красотой доставляют совсем простые опыты, для осуществления которых в оборудовании почти нет нужды, а вот выдумка должна быть изощренной, дерзкой, неожиданной! Когда при мне сочувственно говорят о каком-либо физике, что вот-де его творческая жизнь сложилась неудачно, оказалась нерезультативной из-за того, что он был недостаточно обеспечен хорошим оборудованием, я, не вступая в разговор, вспоминаю о Ферми, Резерфорде, Лебедеве и о многих других экспериментаторах рангом пониже, к кому с полным основанием можно отнести строки поэта:

> Кто сызмальства песню любить приучен,
> Тот может ничем сочинять на ничем.
>
> *Семен Кирсанов*

Итак, об опытах Рэлея в связи с необходимостью ответить на вопросы, возникшие у читателя. Сначала о частоколе молекул-спичек на поверхности воды. Чтобы проверить описанные выше представления о строении адсорбционного слоя в виде частокола молекул, Рэлей проделал удивительно простые опыты. Вот их описание.

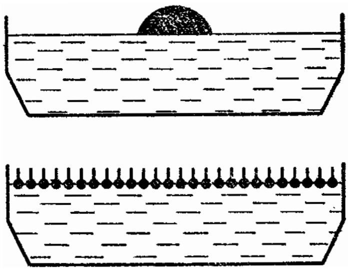
На поверхность чистой воды он помещал каплю оливкового масла, молекулы которого в наших рассуждениях — аналог молекул ПАВ. Капля исчезала, видимо, распадаясь на отдельные молекулы, которые покрывали поверхность воды, много большую чем та, которую покрывала капля. Происходило вот что: масло адсорбировалось на поверхности воды.

Если знать площадь поверхности воды S (это определить очень просто) и быть уверенным в том, что капля масла определенного объема V (и его определить просто) полностью «заселила» поверхность воды своими молекулами, которые расположены в один слой (а вот это определить сложно), то толщину такого слоя, т. е. длину молекулы l, можно определить по простой формуле: $l = V/S$. В нашей модели l — высота частокола.

В последовательности этих рассуждений есть «тонкое» место, на которое мы уже обратили внимание читателя. Ка́к убедиться в том, что молекулы капли масла закрыли собой всю поверхность воды, нигде не оставив пятачка водной поверхности и нигде не образовав слоя более толстого, чем высота одномолекулярного частокола. Лорд Рэлей сумел убедиться в этом удивительно простым способом. Зная, что частички камфоры на поверхности воды все время движутся, «пляшут», а на поверхности масла спокойны, он поставил следующий опыт: в таз с водой капал капли оливкового масла разной массы, ждал пока они растекутся, а затем бросал туда немного тонкого порошка камфоры. Частички камфоры переставали «плясать», когда масса капли достигала определенной величины m^* — необходимой и достаточной, чтобы одномолекулярным слоем закрыть всю поверхность воды. Если же масса капли превышала эту величину, на поверхности воды образовывались масляные пятачки, как на жирном бульоне.

Кстати, пару слов о том, почему частички камфоры на воде «пляшут». Растворяясь в воде, камфора понижает поверхностное натяжение воды на границе с камфорой. Но частичка камфоры имеет неправильную форму, из-за чего ее растворение вдоль периметра происходит неравномерно, а следовательно, неравномерно уменьшается и поверхностное натяжение. Это приводит к тому, что под влиянием разности сил поверхностного натяжения частичка и смещается, и поворачивается — пляшет!

То, что происходит при растекании капли масла по поверхности воды, удобно пояснить, воспользовавшись такой аналогией. Табун коней пьет воду из длинного желоба. Если число коней таково, что они все умещаются вдоль желоба, у воды образуется один ряд (слой) коней, и каждый конь стоит перпендикулярно желобу. Если же коней в табуне больше, часть их будет стоять в стороне, представляя собой аналог жирных пятачков на бульоне. (Эту аналогию придумал американский физик Эрик Роджерс. Только у него не кони у желоба с водой, а свиньи у кормушки. Мне же кони нравятся больше, чем свиньи.)



Капля поверхностно-активной жидкости, растекшаяся по поверхности воды, образует на ней частокол молекул

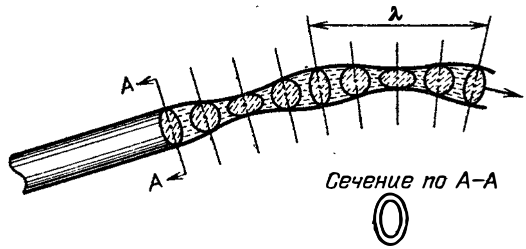
После этого небольшого отступления возвратимся к результатам опытов Рэлея.

Рэлей заполнял водой таз радиусом $R = 41$ см, т. е. площадью поверхности $S \approx 5{,}27 \cdot 10^3$ см^2. В его опытах с каплями оливкового масла масса капли $m^* = 8 \cdot 10^{-4}$ г, т. е. объем капли $V = m^*/\rho \approx 8{,}9 \cdot 10^{-4}$ см^3, где $\rho = 0{,}9$ г/см^3 — плотность масла. Теперь легко определить высоту частокола: $l = V/S = m^*/\pi R^2 \rho = 1{,}7 \cdot 10^{-7}$ см. Найденное значение приблизительно в десять раз превосходит среднее межатомное расстояние в молекуле, а следовательно, молекулу масла следует представлять себе в виде цепочки, состоящей из многих атомов. С этого мы, собственно, и начинали.

Итак, вследствие адсорбции масла на поверхности воды образуется частокол удлиненных молекул. То же и при адсорбции молекул мыла. Неважно, что на поверхность воды они попали не в виде капли мыла, а «всплыли» к поверхности из объема воды. Важен конечный результат: формируется адсорбционный слой. Каждый физик-экспериментатор, думая об опыте Рэлея, должен испытывать чувство зависти. Разумеется, белой. Многие, сохранив идеи Рэлея, совершенствовали его методику. В их опытах появлялись микродинамометры, специальные кюветы. Все это вызывает всего лишь почтительное к себе отношение, а удивление и восторг остаются адресованными Рэлею.

Второй вопрос был следующим: как скоро молекула мыла, растворенного в объеме воды, выходит на ее поверхность? Ответ на него Рэлей получил в опыте, идея которого определила собой огромное количество исследований эффекта адсорбции, проводящихся вот уже на протяжении столетия. Опыт был поставлен так. Из сосуда, содержащего мыльную воду, с некоторой скоростью v вытекала струя. Отверстие, из которого она вытекала, было сделано не круглым, а эллиптическим и, следовательно, струе принудительно придавалась форма, при которой ее поверхность была не минимальной, а искусственно увеличенной. В этом случае в текущей струе будут происходить колебания: эллипс превратится в окружность, а затем, по инерции, опять в эллипс, а затем — опять в окружность и т. д. Период этих колебаний τ должен зависеть от поверхностного натяжения жидкости α, так как именно оно вынуждает колебание струи. Такую зависимость мы получим позже в очерке, посвященном колебаниям пузыря-маятника. (Окажется, что $\tau \sim \alpha^{-1/2}$, где α — коэффициент поверхностного натяжения.)

Рэлей рассуждал так. В момент, когда струя выходит из отверстия, обогащение ее поверхности молекулами мыла еще не произошло и, следовательно, коэффициент поверхностного натяжения почти не должен отличаться



Пульсация струи, вытекающей из эллиптического отверстия

от его значения для чистой воды. Со временем, а значит, и с расстоянием от выходного отверстия, поверхность струи будет вследствие адсорбции обогащаться молекулами мыла. Об этом процессе часто говорят так: поверхность стареет, это приводит к уменьшению коэффициента поверхностного натяжения и соответственно к увеличению периода колебаний струи τ. Через некоторое время процесс обогащения поверхности струи молекулами мыла завершится. Если приведенные рассуждения верны, то, как только завершится процесс адсорбционного обогащения поверхности струи, период колебаний струи установится. Зная скорость струи v и определив то расстояние от выходного отверстия L, начиная с которого λ остается неизменным, можно определить $\tau^* = L/v$. Очень просто! Замысел опыта тем более поражает, что, располагая элементарными средствами и подобрав надлежащим образом условия проведения опыта (площадь и форму сечения струи, скорость ее вытекания из отверстия), удается измерить не только значение коэффициента α, но и происходящее со временем его изменение, обусловленное процессом адсорбирования молекул мыла. В опытах Рэлея величина τ^* оказалась $\simeq 10^{-2}$ с. За это время α изменился, как мы знаем, более, чем в два раза. Рэлей явно умел сочинять «ничем на ничём».

Мы хотели еще обсудить вопрос о том, что̀ происходит с пленкой, ограничивающей пузырь, когда он раздувается. Ясно что̀ – пленка растягивается. При этом частокол расположенных на его поверхности молекул мыла должен был бы редеть и могли бы появляться островки, свободные от адсорбированных молекул. Этого, однако, не происходит, так как скорость адсорбции велика и вслед за растяжением пленки на ее поверхность из объема пленки будут выходить молекулы мыла, достраивая, достаточно быстро «ремонтируя» частокол.

Простая логика подсказывает следующую стратегию «ремонта»: на поверхность пленки из ее объема должно выйти такое количество молекул мыла, которое окажется достаточным для полного восстановления структуры частокола, существовавшего на поверхности пленки до ее растяжения. При этом, казалось бы, пленка не должна сохранить никаких воспоминаний о том, что пузырь раздувался, а она растягивалась. В действительности, однако, объем жидкой пленки обеднится молекулами мыла, которые ранее беспорядочно блуждали в пленке, а теперь, приняв участие в «ремонте» поверхностного частокола, вынуждены вести успокоенную, «упорядоченную» жизнь.

Немного упрощая реальную ситуацию, предположим, что при растяжении пленки структура «частокола» будет оставаться неизменной, а это означает, что объем пленки будет обедняться молекулами мыла вплоть до полной их потери. Когда же все молекулы ПАВ выйдут из объема растягиваемой пленки на ее поверхность, дальнейшее растяжение пленки будет приводить к понижению заселенности ее поверхности молекулами мыла, к поредению частокола.

Построим элементарную теорию этого явления, или, говоря попроще, решим задачу о предельном радиусе пузыря R^*, до которого адсорбция на его поверхности будет все еще совершенной, т. е. без нарушения сплошности. Если этот пузырь мы станем выдувать из капли мыльного раствора, радиус которой r и в которой концентрация мыла равна c, то в нашем распоряжении окажется n_c молекул мыла, которые мы можем расположить на поверхности пузыря предельного размера. Очевидно, если a – среднее межмолекулярное расстояние в жидкости, то

$$n_c = \left(\frac{4}{3}\pi r^3/a^3\right)c.$$

С другой стороны, для того чтобы и внешнюю, и внутреннюю поверхность предельного пузыря покрыть однослойной пленкой молекул мыла, необходимо иметь

$$n_s = 2 \cdot 4\pi (R^*/a)^2$$

молекул. Тогда R^* находится из условия $n_c = n_s$, т. е.

$$R^* = (cr^3/6a)^{1/2}.$$

Приравнивая объем начальной капли объему пленки пузыря:

$$4\pi r^3/3 = 4\pi R^{*2} h^*,$$

можно найти толщину пленки предельного пузыря:

$$h^* = 2a/c.$$

Немного неожиданный результат: толщина пленки оказалась не зависящей ни от радиуса начальной капли, ни от радиуса предельного пузыря. Разумно ли это? Вполне разумно! Это просто означает, что пленка предельного пузыря состоит из чистой, «обезмыленной» воды между двумя слоями молекул мыла. Чем больше было растворено мыла в воде (больше c), тем меньше будет «обезмыленной» воды (меньше h^*!).

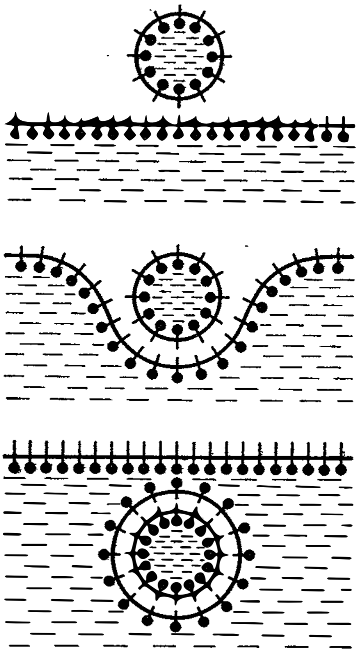
Сделаем некоторые количественные оценки. Если $r = 10^{-3}$ м, $c \approx 10^{-1}$, $a \approx 5 \cdot 10^{-10}$ м, то оказывается, что $R^* \approx 2 \cdot 10^{-1}$ м, а $h^* \approx 10^{-8}$ м. А вот если $r = 10^{-2}$ м, то $R^* \approx 6$ м. Такой пузырь очень сложно выдуть по «техническим причинам»: он лопнет раньше, чем созреет. Впрочем, мне встретилось рекламное сообщение (с фотографией!) о том, что некоему любителю мыльных пузырей удалось выдуть долгоживущий пузырь, радиус которого $R^* \approx 1{,}5$ м. Недавно в газетах появилось сообщение о том, что житель Берна (Швейцария) выдул самый большой мыльный пузырь, он был удлиненным и имел длину более 4 м. Имя автора рекорда отныне будет вписано в «Книгу рекордов».

Что будет с пузырем, который достиг предельного размера? При дальнейшем раздутии адсорбированный частокол на его поверхности должен редеть. Жизнеспособность такого пузыря с ростом радиуса должна быстро убывать и «раздувшаяся смесь воды и мыла» лопнет. Должна лопнуть!

Мыльные антипузыри

И название очерка, и существо обсуждаемого явления заимствовано мною из статьи Б. С. Павлова-Веревкина, опубликованной в журнале «Химия и жизнь» (1966, № 11). Автор статьи явно принадлежит к той лучшей категории научных работников, которые умеют не только смотреть, но также видеть и объяснять увиденное, находя ему место среди известных фактов и идей.

В статье рассказывается вот о чем. Если на плоскую поверхность воды, в которой растворено моющее вещество (например, шампунь), упадет капля такого же раствора, может произойти неожиданное: капля, преодолев поверхностный слой жидкости, обогащенный молекулами поверхностно-активного вещества, проникнет в жидкость и в ее объеме образует сложную конструкцию: капля, окруженная слоем газа, за которым находится жидкость. Эту замкнутую прослойку газа естественно назвать мыльным антипузырем. Обычный мыльный пузырь – это сферический слой жидкости между двумя газовыми средами, а мыльный антипузырь – это сферический слой газа между двумя жидкими средами. Не знаю, существует ли такое понятие «антианалогия», но термин «мыльный антипузырь» явно возник по «антианалогии», когда не все подобно, а все наоборот: вместо отсутствия вещества – его наличие, а вместо наличия вещества – его отсутствие. Процесс образования антипузыря можно изобразить так, как это сделано на приводимых рисунках. И поверхность воды, и поверхность падающей на нее капли покрыты слоем поверхностно-активных молекул-спичек, при этом вовне обращены концы молекул, «не любящие» воду. Капля, подлетающая к поверхности, изгибает ее. Причин тому может быть несколько. Например, такая: увлечение падающей каплей слоя воздуха, который, препятствуя слиянию капли с поверхностью воды, изгибает эту поверхность. Может играть роль и то обстоятельство, что концы поверхностно-активных молекул, «не любящие» воду, препятствуют слиянию капли с водой, а значит, отталкивают воду от капли.



Последовательные стадии образования «отрицательного» пузыря

Заключительный этап процесса состоит в том, что над каплей смыкается изогнутая поверхность воды и образуется замкнутая конструкция – мыльный антипузырь.

Опыты с антипузырями обнаружили много фактов и возбудили множество вопросов, безусловно, достойных поисков ответов на них. Мы познакомимся с этими опытами – простыми и информативными. Выяснилось, что «отрицательные» мыльные пузыри, значение радиуса которых $R_а$ находится в интервале от $5 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ м, медленно всплывают к поверхности воды. И притом тем медленнее, чем больше размер пузыря. И еще одно важное наблюдение: если пузырь лопается в объеме жидкости, возникает газовый пузырек, радиус которого $R_п \approx 10^{-4}$ м. Оба эти факта свидетельствуют о том, что на рисунке мы правильно изобразили структуру отрицательного пузыря – газовый сферический слой в жидкости. Толщина этого слоя h связана с величинами $R_а$ и $R_п$ формулой

$$h = R_п^3/3R_а^2,$$

которая легко получается, если объем слоя приравнять объему всплывающего пузырька. При $R_п \approx 10^{-4}$ м и $R_а \approx 10^{-3}$ м оказывается $h \approx 3 \cdot 10^{-7}$ м. Это близко к толщине пленки обычных мыльных пузырей, при которой должны обнаруживаться интерференционные цвета. В одном из описаний отрицательных пузырей сказано, что на их поверхности «... была видна переливающаяся радужная пленка». Позже, в очерке об оптике мыльных пузырей, будет подробно рассказано об интерференционных цветах и радужной окраске.

Теперь – о медленном всплывании. Здесь все ясно: всплывающий мыльный антипузырь подвержен значительно меньшей выталкивающей силе $F_\uparrow$, чем обычный газовый пузырь того же размера. Легко понять, что, в согласии с законом Архимеда, силы, определяющие всплывания газового пузыря ($F_п$) и антипузыря ($F_а$) равных радиусов, относятся так, как объемы заключенного в них газа:

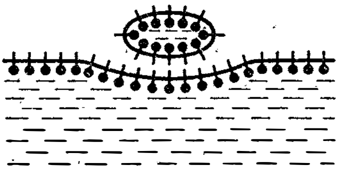
$$F_п/F_а = (R_а/R_п)^3.$$

При $R_п \approx 5 \cdot 10^{-4}$ м, а $R_а \approx 5 \cdot 10^{-3}$ м, оказывается, $F_п/F_а \approx 10^3$. Такое отличие сил $F_п$ и $F_а$ и является причиной весьма медленного всплывания антипузыря. Это, например, означает, что, подойдя к поверхности воды, мыльный пузырь, даже если он и не маленький, может не найти в себе силы «пробить» поверхностный слой и выйти из объема.

Попытаемся представить себе, как может лопнуть мыльный антипузырь. Видимо, так же, как и обычный, с тем лишь отличием, что случайно возникшее зародышевое «отверстие» появится не на верхнем полюсе, как у пузыря на воде, а на нижнем полюсе, где газовая прослойка должна быть тоньше. В обсуждаемом случае роль отверстия в истинной пленке должна играть водяная перемычка между жидким ядром отрицательного пузыря и его жидким окружением.

Видимо, физикохимики займутся подробным изучением отрицательных мыльных пузырей. Вопросов очень много: чем определяется толщина газовой прослойки? как она зависит от сорта поверхностно-активных молекул? от радиуса пузыря? И много иных.

Когда я впервые читал статью Б. С. Павлова-Веревкина, в которой он с полным основанием ставит во взаимосвязь формирование отрицательного пузыря и образование на поверхности воды не тонущих в ней жидких капель, мне вспомнились строки Константина Паустовского: «... особенно хорош спорый дождь на реке. Каждая капля выбивает в воде круглое углубление, маленькую водяную чашу, подскакивает, снова падает и несколько мгновений, прежде чем исчезнуть, еще видна на дне водяной чаши. Капля блестит и похожа на жемчуг». Конечно же, поверхность реки была покрыта слоем примесных молекул, и Паустовский видел зародыш возможного отрицательного пузыря. Писатель, сидя у реки, обратил внимание на ситуацию подобную той, которую ученый наблюдал в условиях лаборатории. Видимо, ученому надлежит разделить честь открытия с писателем.



Между «загрязненной» поверхностью капли воды и «загрязненной» поверхностью водяного слоя может сохраняться газовая прослойка

Энергия, заключенная в мыльном пузыре

Создавая его, только что оторвавшегося от соломинки и парящего в воздухе, мы трудились: напрягали легкие, надували щеки. Скажем так: тратили энергию. Немалая (видимо, основная) часть этой энергии рассеялась в виде тепла,– немного комнату согрели, немного сами согрелись. Но какая-то часть, конечно же, потрачена на создание пузыря и, следовательно, заключена в нем. Вот об этой энергии и рассказ.

Когда речь идет о физическом объекте (а пузырь – объект физический), среди прочих его характеристик следует интересоваться заключенной в нем энергией. Энергия – характеристика фундаментальная, и обсудить ее необходимо. Это тем более следует сделать, что, думая об энергии мыльного пузыря, мы столкнемся с необходимостью обсудить некоторые физические величины, характеризующие пузырь. Без понимания этих величин мы застрянем где-нибудь в самом начале нашего пути.

Итак, об энергии, заключенной в свободно парящем мыльном пузыре. Она, очевидно, состоит из трех слагаемых: энергии, связанной с внешней поверхностью пузыря, с его внутренней поверхностью и с газом, заключенным в пузыре. Так как толщина мыльной пленки h значительно меньше радиуса пузыря R, то можно полагать, что внешняя и внутренняя поверхности пузыря между собой практически равны, и, значит, первые два слагаемых тоже равны. Строго говоря, имеются еще два слагаемых энергии, связанной с пузырем: энергия слоя жидкости, заключенной между двумя адсорбционными слоями, и потенциальная энергия тех капелек жидкости, которые возникнут, когда парящий в воздухе пузырь лопнет и капельки упадут. Эти два слагаемых энергии мы учитывать не станем, так как они связаны собственно с жидкостью безотносительно к тому, формирует она пузырь или существует в виде капли как таковая. А нас интересует энергия, связанная именно с пузырем. Ее можно записать следующим образом:

$$W = S\alpha + \frac{3}{2} V \Delta P_г,$$

где S — площадь поверхности пузыря, α — коэффициент поверхностного натяжения — энергия на единицу площади поверхности, V — объем пузыря, $\Delta P_г$ — дополнительное к атмосферному (P_0) давление газа в объеме пузыря, которое компенсирует давления, обусловленные натяжением пленки и ее искривленностью. Это давление называется лапласовским ($P_л$), далее оно подробно обсуждается. Итак $\Delta P_г = P_л$, а полное давление газа в пузыре

$$P_г = P_0 + P_л.$$

Обсуждая энергию пузыря, мы должны учитывать давление $P_л$, хотя $P_л \ll P_0$. Соответственно, мы будем полагать, что полное число молекул газа в пузыре $N_г$ состоит из тех, которые компенсируют атмосферное давление, N_0, и тех, которые компенсируют лапласовское давление, $N_л$, т. е. $N_г = N_0 + N_л$.

Первое слагаемое, определяющее энергию W, вопросов не вызывает. Скажем так: видимо, не должно вызывать. А теперь обратимся ко второму слагаемому. Его можно бы точно вычислить, но, пожалуй, делать этого не стоит, так как в любом учебнике молекулярной физики (в том числе и в школьном) формула, устанавливающая связь между энергией газа, его давлением и занимаемым им объемом, подробно выводится. Она совпадает с записанным нами вторым слагаемым: $3VP_л/2$. Площадь поверхности пузыря S и его объем V нам известны: $S = 2 \cdot 4\pi R^2$, а $V = 4\pi R^3/3$. А вот величины α и $P_л$ требуют специального обсуждения.

Вначале поговорим о величине α. В нашем повествовании о пузырях (мыльных и не мыльных), в конструкции которых поверхности принадлежит почетное место, поверхностная энергия – величина первейшая, и поэтому следует посмотреть на нее с различных точек зрения. Физики часто говорят о том, что о величинах и явлениях, которые физик изучает, он обязан уметь рассказать несколькими различными способами, становясь при этом на различные точки зрения.

Прежде чем приступить к обсуждению величины α, убедимся в ее реальности с помощью наглядного опыта. Подчеркну: наглядного. Его результат для нас важен даже в том случае, если мы только увидим, не пытаясь вначале истолковать этот результат.

Итак, опыт. С помощью фотоаппарата (лучше, кинокамеры) проследим за процессом набухания двух «капель»: одна из них – реальная капля воды или масла на конце тонкой трубки, а другая «капля» формируется в процессе заполнения жидкостью тонкой резиновой мембраны, закрепленной по кругу. Оказывается, что после приведения к одному масштабу, контуры этих «капель» близки друг к другу.

Интуиция, питаемая увиденным, подсказывает естественное предположение, что подобно резиновой мембране поверхностный слой жидкой капли, т. е. поверхность жидкости, испытывает некоторое натяжение. В этом смысле поверхностный слой жидкости и резиновая пленка подобны и не более того. О признаках, их различающих, будет рассказано позже, а здесь – лишь о предположении, подсказанном увиденным опытом: поверхность жидкости испытывает натяжение, и с ним, видимо, связана некоторая энергия. Эту энергию в расчете на единицу площади поверхности мы и обозначим буквой α.

Теперь поговорим о поверхностной энергии жидкости не мимоходом, а подробнее. Молекулы в объеме жидкости и на ее поверхности находятся в различных условиях. Те, которые расположены в объеме, имеют полный комплект соседей, и все силы парного взаимодействия с каждым из соседей одинаковы. А вот молекулы, расположенные на поверхности, окружены соседями неравномерно: все ближайшие соседи либо расположены на поверхности, либо в объеме жидкости, а со стороны пара их почти нет. «Почти» – это значит, что в единице объема пара число молекул исчезающе мало по сравнению с их числом в единице объема жидкости. В этой ситуации молекула, расположенная на поверхности, должна испытывать на себе действие силы, прижимающей ее к жидкости, стремящейся внедрить ее в объем жидкости.

Если жидкость не подвержена действию никаких внешних сил, скажем, находится в невесомости и ее форму определяет только стремление молекул уйти с поверхности в объем, она должна принять форму сферы, так как из всех фигур данного объема, наименьшую поверхность имеет сфера – в геометрии это доказывают точно. Уйдя в объем, молекулы обретают больше соседей.

Здесь кажется уместной аналогия. Как и всякая иная, она ограничена, но при этом не перестает быть уместной. В великолепной книге Р. Шовена «От пчелы до гориллы» описывается явление коллективной терморегуляции в стаде пингвинов. В лютые морозы, усугубленные сильнейшим ветром, стадо пингвинов, состоящее из сотен птиц, организуется в так называемую «черепаху», имеющую форму круга. Пингвины прижимают друг к другу свои круглые туловища и образуют двумерную «шестигранную» плотную упаковку. Такая черепаха – аналог двумерной капли. Каждая птица стремится оказаться внутри скопления, где больше соседей и поэтому теплее, и это придает скоплению птиц круглую форму. На этом, пожалуй, аналогия исчерпывается. И все же хочется упомянуть все детали, которые относятся не столько к проблеме «двумерная капля», сколько к проблеме «аналогия». Оказывается, что живая двумерная капля, состоящая из пингвинов, медленно вращается так, чтобы птицы, находящиеся в наветренной стороне, периодически переходили в подветренную сторону. И еще: на двадцатиградусном морозе в центре вращающейся капли температура оказывается более 30 градусов, разумеется, тепла. Обе отмеченные детали – дань тому, что каплеподобное скопление пингвинов составлено из живых организмов. К капле жидкости это не относится, аналогия обрывается на границе «мертвое – живое».

Попытаемся оценить значение удельной поверхностной энергии α. Точно вычислить его – задача сложная, а вот приближенно оценить, заботясь при этом и об установлении физического смысла α, – эта задача нам доступна.

Как мы знаем, значение α обусловлено тем, что у тех атомов, которые не «втиснулись» в объем жидкости, а остались на ее поверхности, неполный комплект соседей.

Рассмотрим простую жидкость, в структуре которой плотно упакованы одинаковые атомы сферической формы. В объеме такой жидкости каждый атом имеет $z_0 \approx 12$ соседей. Атому, расположенному на поверхности, не хватает $(z_0 - z_s)/2$ соседей, где $z_s = 6$ – число соседей, лежащих в плоскости поверхности.

Строго говоря, в жидкости, структуру которой мы обсуждаем, и z_0 немного меньше 12, и z_s немного меньше 6. Скажем, когда расплавляется кристалл, имеющий плотноупакованную структуру (медь, свинец, золото и др.), значение z_0 в жидкой фазе оказывается не 12, а около 11. Ради наглядности и симметричности обсуждаемой структуры допустим все же, что $z_0 = 12$, а $z_s = 6$. Это не самое опасное упрощение, которое мы допускаем в нашем оценочном расчете. Если считать, что на единичной поверхности находится n_s атомов и что энергия связи двух соседей равна ε, т. е. в расчете на каждого из них равна $\varepsilon/2$, то коэффициент α можно определить формулой

$$\alpha = -[n_s(z_0 - z_s)/2] \cdot (\varepsilon/2).$$

Обсудим и оценим величину ε. Естественно ее связать с теплотой испарения, потому что испарить – это значит разорвать все связи и разнести атомы подальше друг от друга. Мысленно проделаем это с одним кубиком жидкости, в объеме которого заключено n_0 атомов, каждый из которых имеет z_0 соседей. Для испарения этого кубика необходимо затратить энергию $\theta_и = -n_0 z_0 \varepsilon/2$, а это означает, что

$$\varepsilon = -2\theta_и/n_0 z_0.$$

Учитывая, что $n_s = 2/(\sqrt{3}\,a^2)$, $n_0 = 4/(3a^3)$, где a – межатомное расстояние, для избранной нами простейшей модели жидкости мы можем записать

$$\alpha \approx \frac{\sqrt{3}}{8} a\theta_и.$$

Полученную формулу не следует сопоставлять с экспериментально найденным значением α для любого вещества, например для воды, так как форма молекулы воды очень далека от сферической. А вот расплавленные металлы – медь, свинец, серебро, золото – имеют структуру, близкую к нашей модели и здесь сравнение допустимо.

Оценим по нашей формуле α для свинца. Так как $\theta_и \approx 8 \cdot 10^9$ Дж/м^3, $a \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м, то $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-1}$ Дж/м^2, а из измерений следует $\alpha \approx 4 \cdot 10^{-1}$ Дж/м^2. Не так уж плохо для такой упрощенной оценки, как наша.

Обсудим теперь величину $P_Л$. Зная лишь то, что пузырь существует не изменяя своих размеров, можно утверждать, что избыточное давление газа в пузыре в точности равно давлению пленки пузыря на газ. Иначе пленка двигалась бы, и пузырь либо раздувался бы, либо сжимался. Именно давлением пленки на газ мы и займемся.

Поступим вот как. Предположим, что радиус пузыря R увеличился на малую величину $\Delta R \ll R$. При этом объем пузыря увеличится на $\Delta V = 4\pi R^2 \Delta R$, а его двухсторонняя поверхность на $\Delta S = 16\pi R \Delta R$. Каждый легко убедится в том, что записанные формулы правильны.

Если эти изменения произошли при весьма малом изменении давления пленки на газ $P_Л$, то при этом будет совершена работа $\Delta A = P_Л \Delta V$, а поверхностная энергия изменится на $\Delta W_S = \alpha \Delta S$. Сравнивая ΔA и ΔW_S, мы получим

$$P_Л = 4\alpha/R.$$

Полученная формула выражает слияние двух противоположных тенденций: газ стремится расшириться, но это должно сопровождаться увеличением поверхности пленки, что невыгодно для энергии, а пленка стремится сжаться, но это должно сопровождаться и сжатием газа, что также невыгодно! При паре значений $P_Л$ и R, определяемых формулой, тенденции уравновешиваются.

Легко найти связь между количеством газовых молекул, компенсирующих лапласовское давление в пузыре, $N_Л$, и его радиусом. Известно, что

$$P = nkT,$$

где n – число молекул газа в единице объема, k – постоянная Больцмана и T – абсолютная температура. Так как $N_Л = n \cdot 4\pi R^3/3$, а $P = P_Л = 4\alpha/R$, то

$$N_Л = 16\pi R^2 \alpha/3kT.$$

Применительно к одноатомному газу из полученной формулы следует, что, так как $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К,

$T = 3 \cdot 10^2$ К, $\alpha = 3 \cdot 10^{-2}$ Дж/м^2, то для создания пузыря радиусом $R = 10^{-2}$ м необходимо вдуть в него избыточных $N_Л = 1{,}2 \cdot 10^{16}$ атомов. Ни меньше, ни больше, а ровно столько.

Ну вот теперь мы располагаем всем необходимым для вычисления энергии, заключенной в мыльном пузыре. Итак:

$$W = W_s + W_г = S\alpha + 3VP_Л/2 = 8\pi R^2\alpha + 2\pi R^3 \cdot 4\alpha / R = \\ = 16\pi R^2 \alpha.$$

Любопытный результат: в $N_Л$ молекулах газа в пузыре запасено ровно столько энергии, сколько в поверхности пленки пузыря: $8\pi R^2\alpha$.

Мы в этом убедились, определяя энергию газа формулой $W_г = \frac{3}{2} VP_Л = 8\pi R^2\alpha$. Убедимся в этом, просуммировав кинетическую энергию всех $N_Л$ молекул. Очевидно, $W_к = N_Л \cdot \frac{mv^2}{2}$. Величину $N_Л$ мы определяли, а $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT$, следовательно,

$$W_к = \frac{16\pi R^2\alpha}{3kT} \cdot \frac{3}{2} kT = 8\pi R^2\alpha.$$

Проницательный читатель заметит, что если в объеме пузыря одноатомный газ заменить газом, молекулы которого посложнее, его энергия изменится существенно, а поверхностное натяжение может измениться мало и наше заключение о «равновесии» пузыря потеряет основание. Если, например, газ двухатомный, то его молекулу можно представить себе в форме двух шариков, соединенных стерженьком, а это означает, что кроме трех поступательных степеней свободы молекула будет иметь еще две вращательные. Итого — пять, и, следовательно, энергия газа будет не $(3/2)PV$, а $(5/2)PV$.

Читатель, разумеется, имеет право на сомнения. Здесь, однако, все оказывается благополучным, так как давление, создаваемое газом, определяется только поступательным движением молекул, поскольку именно оно является носителем импульса, передаваемого атомом той поверхности, на которую газ оказывает давление. В нашем случае энергия вращения молекул «не в счет», и поэтому, сравнивая энергии, надо иметь в виду лишь энергию поступательного движения молекул. А для одноатомного газа иной и нет.

Оценим избыточную энергию, запасенную в пузыре. Если $R = 10^{-2}$ м, $\alpha = 3 \cdot 10^{-2}$ Дж/м^2 (именно такая α у мыльной воды), то $W = 1{,}44 \cdot 10^{-4}$ Дж. Много это или мало? Плохо задан вопрос, на него нельзя ответить. Лучше так: на что способно такое количество энергии?

Для того чтобы разумно ответить на этот вопрос, нужны обоснованные предположения о том, во что̀ превращается лопнувший мыльный пузырь. Или иными словами — на что̀ расходуется энергия, освободившаяся в связи с исчезновением пузыря. Далее мы узнаем о том, что пузырь превращается в несметное количество капелек и жидких цилиндриков, которые могут нагреваться и обретать кинетическую энергию. Очевидно, безнадежна попытка как-то учесть эту очень сложную картину разрушения пузыря. Можно сделать простейшее из мыслимых предположений — вся энергия передается единственной капле, в которую превратился лопнувший пузырь.

Допустим вначале, что, получив энергию пузыря, капля израсходовала ее, чтобы повысить свою температуру. Можно записать следующее равенство:

$$W = 4\pi R^2 h c \rho \Delta T,$$

где c — удельная теплоемкость воды, ρ — плотность воды, h — толщина пленки пузыря. Таким образом,

$$\Delta T = 4\alpha / h\rho c.$$

При

$$\alpha = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^2, \ \rho \approx 10^3 \text{ кг/м}^3,$$
$$c = 4{,}18 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К) и } h = 10^{-7} \text{ м}$$

получим $\Delta T \approx 0{,}3$ К.

Очевидно, это — оценка верхнего предела степени возможного нагрева капли. В действительности каждая из множества образующихся капель нагревается существенно меньше, так как подавляющая часть энергии, освободившейся при разрушении пузыря, превратится в поверхностную энергию образовавшихся капель.

В том, что мы получили очень завышенную оценку ΔT, можно убедиться, допустив следующее: не изменив своей температуры, капля начнет поступательно двигаться с некоторой скоростью $v_{\text{кап}}$ или взлетит на высоту $l_{\text{кап}}$. Определим $v_{\text{кап}}$ и $l_{\text{кап}}$. Так как масса капли $m = 4\pi R^2 h\rho$, то из условия $mv_{\text{кап}}^2/2 = W$ следует

$$v_{\text{кап}} = (2W/m)^{1/2} \approx (8\alpha/h\rho)^{1/2}.$$

А из условия $W = mgl_{\text{кап}}$ следует

$$l_{\text{кап}} = 4\alpha/gh\rho.$$

При уже встречавшихся значениях α, h и ρ и при $g \approx 10$ м/с^2, находим $v_{\text{кап}} \approx 50$ м/с и $l_{\text{кап}} = 120$ м.

Мы получили очень высокие значения и $v_{\text{кап}}$, и $l_{\text{кап}}$. Это обстоятельство убеждает нас в том, что оценка ΔT тоже очень завышена.

Кажется удивительным, во всяком случае неожиданным, что оценки ΔT, $v_{\text{кап}}$ и $l_{\text{кап}}$ оказались не зависящими от радиуса пузырьков. Интуиция против этого возражает. А все дело в том, что и энергия, запасенная в пузыре, и его масса одинаковым образом зависят от R и, следовательно, в наших формулах R должен исчезнуть. Это замечание, пожалуй, должно примирить интуицию с оценками.

Мыльный пузырь и резиновый шарик

В предыдущем очерке мы мимоходом сравнивали резиновую пленку с поверхностным слоем жидкости и нашли нечто, роднящее их. Здесь мы продолжим начатое сравнение и обнаружим признаки, по которым резиновая пленка и поверхностный слой жидкости существенно различаются. Нам очень важно знать об этих различиях.

Возьмем, например, мыльный пузырь и воздушный шарик из тонкой резиновой пленки, укрепленные на трубочках так, чтобы их можно было раздувать. При этом сопоставлении мы пренебрегаем очевидными различиями между ними. Шарик, например, можно отделить от трубки, снять и положить в карман, чего нельзя сделать с мыльным пузырем. Поинтересуемся вначале теми признаками, которые роднят пузырь и шарик, пусть даже внешне. Главный из них состоит в том, что если через соломинку или трубку подавать газ, то и пузырек, и шарик будут раздуваться, т. е. увеличивать свой объем. Именно это явление нас интересует. Его мы и обсудим. Как выясняется, при внешнем сходстве наблюдаемого, процессы, которые при этом происходят, существенно различны. Может быть, даже лучше сказать так: принципиально различны.

Итак, вначале будем раздувать мыльный пузырь. Здесь все кажется понятным. На каждом этапе процесса будет устанавливаться равновесие между лапласовским давлением, создаваемым пленкой, и избыточным давлением газа, заполняющего пузырь. Следует лишь обратить внимание на то, что в процессе раздувания пузыря радиус его изменяется неравномерно: вначале, пока он еще не раздулся в полусферу, его радиус будет уменьшаться, достигая минимального значения $d/2$, где d – диаметр трубки, на торце которой пузырь формируется, а затем радиус будет возрастать. В пузыре средних размеров ($R \approx 10^{-2}$ м) давление газа, дополнительное к атмосферному, будет ничтожным: $P_Л = 4\alpha/R = 4 \cdot 3 \cdot 10^{-2}/10^{-2} = 12$ Н/м^2 (Па), т. е. почти в десять тысяч раз меньше атмосферного ($P_0 \approx 10^5$ Па). С ростом размера пузыря дополнительное давление в нем падает по закону $\sim 1/R$. Такое, на первый взгляд, странное поведение пузыря – чем больше газа мы вдуваем в пузырь, тем меньше давление в нем – естественно объясняется уже упоминавшимся свойством пленки. При растяжении, т. е. когда увеличивается поверхность пленки при раздувании, она утоняется, часть атомов из объема переходит на поверхность и при этом почти неизменными остаются и поверхностное натяжение, и строение пленки. Подчеркнем это: неизменными. (Или: не изменяющимися в процессе растяжения.) Из сказанного вытекает важное следствие: усилие, необходимое для увеличения поверхности жидкой пленки пузыря, практически не зависит от ранее достигнутого растяжения.

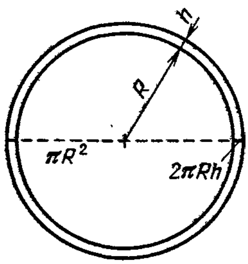
Заметим, что без оговорок сказанное справедливо применительно к плоской мыльной пленке. Если же пленка образует пузырь, то ее растяжение вдуванием газа предполагает еще и необходимость компенсации лапласовского давления $P_Л \sim 1/R$: большие пузыри раздувать легче, чем маленькие.

Займемся теперь шариком из резиновой пленки. Начнем с того давления, которое понадобится, чтобы смятый шарик расправить и придать ему форму сферы. А затем будем сферу раздувать и сразу же убедимся в том, что все происходит совсем не так, как в случае с мыльным пузырем. Окажется, что чем больше резиновый шар раздут, тем труднее его раздувать. Атомы из объема резиновой пленки на ее поверхность не могут переходить, этому препятствует ее строение. С резиной происходит нечто другое: она упруго растягивается, о чем отчетливо свидетельствует увеличение расстояния между двумя отмеченными участками ее поверхности.

Таким образом, вдувая газ в резиновый шарик, мы создаем напряжение σ, которое растягивает упругую резинку. Подчеркнем: говоря о мыльной пленке, мы имеем в виду натяжение, не зависящее от ее предшествовавшей деформации, а говоря о резиновой пленке, мы имеем в виду напряжение, которое с ростом деформации увеличивается. Скажем то же самое иными словами: в отличие от деформации мыльной пленки, деформация резиновой пленки описывается законом Гука: напряжения пропорциональны достигнутой деформации.

Напряжение в раздуваемой резине легко вычислить.

Допустим, что в раздутом резиновом шаре радиуса R при толщине резины $h \ll R$ создано избыточное по отношению к атмосферному газовое давление $P_г$. Так как площадь проекции поверхности полусферы на плоскость экваториального сечения сферы равна πR^2, то сила, приложенная к пленке в этом сечении, $F_P = P_г \pi R^2$. Она уравновешивается силой, создающей напряжение σ в пленке: $F_\sigma = 2\pi R h \sigma$. Из условия $F_P = F_\sigma$ следует



К расчету напряжений в стенке резинового пузыря

$$\sigma = P_г \cdot R/2h.$$

Мы получили известную формулу, которой пользуются все инженеры при оценке прочности сосудов высокого давления. Нам она поясняет закономерности раздувания резинового пузыря: с ростом $P_г$ резина растягивается и увеличивающееся при этом напряжение в ней σ затрудняет дальнейшее раздувание резинового шарика. При этом давление в его объеме возрастает, а не убывает, как в мыльном пузыре. При $P_г \approx 1$ атм $\approx 10^5$ Па, $h = 10^{-4}$ м и $R = 10^{-2}$ м, значение $\sigma \approx 5 \cdot 10^6$ Па. Обратим внимание на то, что всего одна атмосфера создала напряжение в $5 \cdot 10^6$ Па, т. е. 50 атмосфер.

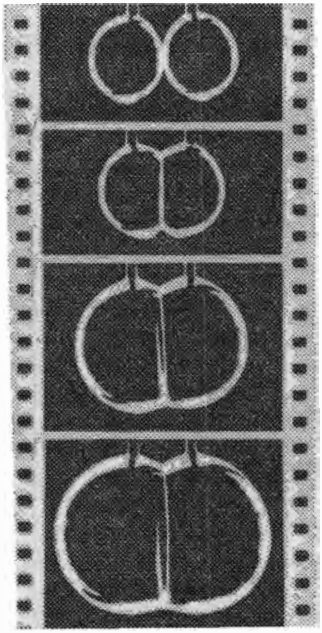
Обсуждение свойств мыльной пленки мы закончили «важным следствием». Сделаем это и сейчас: при растяжении резиновой пленки нужна тем бо́льшая сила, чем больше пленка растянута.

Вот, пожалуй, все, что следовало рассказать, сравнивая мыльный пузырь и резиновый шарик.

Мембрана между мыльными пузырями

То, о чем будет рассказано в этом очерке, настолько просто, что, может быть, и рассказывать об этом не стоило бы. Разве что некоторая курьезность результата оправдывает решение все же рассказать о мембране между двумя мыльными пузырями.

Речь идет о пленке, разделяющей два пузыря. Об ее форме. Плоской эта пленка может быть лишь в том случае, если она разделяет два абсолютно равных пузыря, если она совпадает с плоскостью симметрии совокупности этих пузырей. Такое утверждение можно доказать исходя из общих соображений, а также и формально строго.



Два равновеликих мыльных пузыря соприкасаются вдоль плоской мембраны. Она остается плоской и при последующем увеличении пузырей, если они при этом остаются одинаковыми

Логика «общих соображений» очевидна: пленка должна быть плоской вследствие симметрии. Любое ее отклонение в сторону одного из пузырей нарушило бы симметрию совокупности двух соприкасающихся абсолютно равных пузырей, а мы так старательно подчеркиваем равенство пузырей, что допускать асимметрию составленной из них конструкции никак нельзя.

Теперь иное доказательство, формально строгое. Так как радиусы пузырей равны, то избыточные давления газа в объеме каждого из них $P_Л = 4\alpha/R$ одинаковы и, следовательно, на мембрану с двух сторон действуют уравновешивающиеся силы и она остается плоской.

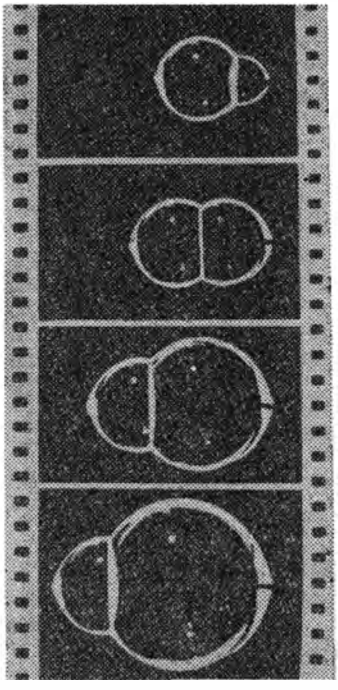
Усложним задачу, обсудив случай, когда мембрана разделяет два пузыря, радиусы которых различны: $R_1 < R_2$. В этом случае на мембрану действует давление

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 4\alpha(1/R_1 - 1/R_2).$$

Сила, обусловленная давлением, направлена в сторону бо́льшего пузыря, в котором давление меньше. Под влиянием давления ΔP мембрана изогнется и примет такую форму, при которой создаваемое ею давление скомпенсирует давление ΔP. Для этого, очевидно, мембрана должна принять форму участка сферической поверхности, радиус которой $R_м$:

$$1/R_м = 1/R_1 - 1/R_2.$$

Вот, пожалуй, и все, что я хотел сообщить читателю о мембране между двумя пузырями. Основное содержание очерка — в последней формуле.



Мембрана, разделяющая два пузыря, втягивается в тот пузырь, который раздувают

Теперь несколько фраз об обещанной курьезности результата. Дело в том, что если один из двух разделенных мембраной пузырей мы будем раздувать, мембрана начнет искривляться, прогибаясь в сторону раздуваемого пузыря. Кажется странным: в пузырь нагнетается воздух, а мембрана все больше вдавливается в пузырь. А физика здесь очень проста, она полностью описывается нашими формулами: раздуваемый пузырь увеличивает свой радиус, а это означает, что избыточное давление в нем не растет, а падает. Именно об этом немедленно и свидетельствует мембрана, прогибаясь навстречу потоку воздуха, который раздувает пузырь.

Убедиться в правдивости рассказа легко может любой читатель. Попробуйте сделать такой опыт. Выдуйте осторожно из трубочки двойной мыльный пузырь. Это часто получается. Обычно при этом нижний пузырь бывает больше верхнего. А теперь потихоньку раздувайте верхний пузырь, и вы должны увидеть, как мембрана втягивается в него. Предупреждаю, что вся картина видна при наблюдении сбоку. Так что придумайте еще и как удобнее смотреть. Надо хорошо захотеть и все у вас получится. Кинограмма, полученная в опыте, иллюстрирует обсуждаемое явление.

Чтобы очерк был логически завершен, замечу, что мембрана между двумя резиновыми баллонами при накачке одного из них, вела бы себя обратным образом, она прогибалась бы в сторону от накачиваемого баллона. Дело здесь в том, что растягиваемая водяная пленка практически не меняет своего натяжения, а натяжение растягиваемой резиновой пленки возрастает. Впрочем, читатель об этом знает, здесь – лишь подтверждение уже известному.

Форма пузыря

Тот пузырь, который свободно парит в воздухе, имеет сферическую форму. Впрочем, он сферический лишь в случае, если идеален, т. е. если сила тяжести не вынуждает перемещаться жидкость в объеме пленки пузыря и, следовательно, не приводит к тому, что пленка внизу оказывается толще, чем вверху, и форма пузыря искажается. Избежать этого можно двумя способами. Первый, не очень совершенный, способ состоит в том, чтобы вынудить пузырь, парящий в воздухе, все время как-то поворачиваться. А второй способ – менее доступный, но абсолютно совершенный, – состоит в том, чтобы поместить пузырь в условия невесомости.

Сравним теперь форму трех различных пузырей: парящего в невесомости, висящего на соломинке и плавающего на воде. Второй и третий пузыри существуют в обычных земных условиях.

Первый образован пленкой постоянной толщины и имеет форму идеальной сферы, второй, отягощен ый капелькой мыльного раствора, которая образовалась внизу пузыря, оказался ею вытянутым, а третий, – третий надо специально и внимательно рассмотреть и только потом поговорить о его форме.

Очевидность – сферическую форму пузыря, парящего в невесомости, все же следует обсудить. Итак: почему парящий пузырь имеет сферическую форму?

Газ, заключенный в замкнутую эластичную оболочку пузыря, естественно стремится расшириться и максимально растянуть ее. Тенденция газа самопроизвольно расширяться обнаруживает себя в великом множестве явлений. Пленке свойственна противоположная тенденция. Она стремится сжаться, сократить свою поверхность, уменьшив при этом связанную с ней энергию. Как всегда в природе борющиеся тенденции находят разумное оптимальное решение. В случае нашей системы такое решение осуществляется, если пузырь примет форму сферы. Как это известно из геометрии, сфера при данной площади замкнутой поверхности обеспечивает максимальный заключенный в ней объем, а именно в этом газ и нуждается. Условия оптимального решения можно сформулировать, имея в виду и интересы поверхности. Форма сферы при данном объеме газа обеспечивает минимальную поверхность, а именно в этом поверхность и нуждается. Удовлетворены обе конкурирующие тенденции...

Теперь – о пузыре, висящем на соломинке. Как правило, его форма отличается от сферической по причине в прямом смысле слова очевидной: в нижней части пузыря видно скопление жидкости, которое немного удлиняет пузырь, придавая ему грушевидную форму. Точно описать эту форму очень не просто. Однако об одной особенности этой формы можно рассказать совсем просто. Какой бы форма ни была, одному требованию она обязана удовлетворять: давление, оказываемое любым участком пленки пузыря на заключенный в нем газ, должно быть одинаково, так как во всем объеме пузыря давление газа постоянно. Если бы это

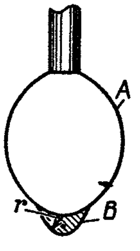


Схема формы пузыря, висящего на трубке

последнее условие почему-либо вдруг оказалось нарушенным, газ начал бы перемещаться в ту область, где его давление меньше, и условие постоянства давления восстановилось бы. Если это так, то приближенно можно считать, что в точке A на нашем рисунке давление, создаваемое изогнутой пленкой, должно компенсировать лишь избыточное давление газа ΔP, а в точке B – еще и давление P_g, обусловленное весом утолщенного участка пленки. Это очень грубое предположение, так как в действительности утолщенный участок пленки (попросту говоря, капля) искажает форму всего пузыря в целом, а не только в точке B. Из-за этого предположения все дальнейшие расчеты весьма приближенны.

Радиусы кривизны пленки в точках A и B определяются из условий $\Delta P = 4\alpha/R_A$, $\Delta P + P_g = 4\alpha/R_B$, откуда

$$R_A = 4\alpha/\Delta P, \quad R_B = 4\alpha/(\Delta P + P_g),$$

таким образом, $R_A > R_B$. Это и означает, что пузырь вытянут, что искривленность пленки в нижней части пузыря больше, чем на его боковых поверхностях.

Наши формулы дают возможность приближенно определить радиус капли r, расположенной внизу пузыря, если известны R_A, R_B и α.

Действительно, величина P_g определяется формулой

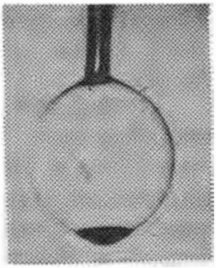
$$P_g = 4\alpha(1/R_B - 1/R_A).$$

Предполагая, что форма капли близка к полусферической, можно записать (m — масса капли, r — ее радиус, ρ — плотность жидкости):

$$P_g = mg/\pi r^2 = 2r\rho g/3.$$

Отсюда находим и радиус капли:

$$r = 3P_g/2\rho g = 6\alpha(1/R_B - 1/R_A)/\rho g.$$

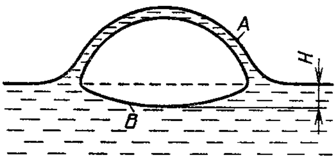


Реальный пузырь на трубке

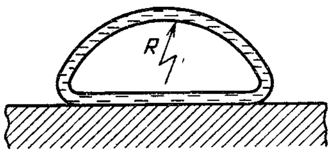
Значения R_A и R_B заимствуем из приведенной фотографии: $R_A = 2 \cdot 10^{-2}$ м, $R_B = 10^{-2}$ м. При таких значениях R_A и R_B и при $\alpha = 3 \cdot 10^{-2}$ Н/м из последней формулы следует $r = 9 \cdot 10^{-4}$ м $= 0{,}9$ мм. Капелька на фотографии имеет размер, близкий к вычисленному. Близкий, но не совпадающий! Но ведь и формулы наши очень приближенные.

Теперь подумаем над формой пузыря на поверхности жидкости. Скажем, на спокойной поверхности пруда. «Сферическая» — так отвечают люди, не очень склонные задумываться. «Полусферическая» — так отвечают поторопившиеся. Отнесем себя к третьей категории, вдумчивых, и попробуем ответить на этот вопрос не торопясь: подумаем, посчитаем, присмотримся к пузырям.

Итак, подумаем. (С этого, пожалуй, следует начинать всегда!) Очевидно, как и в предыдущем случае, форма обязана быть такой, при которой давление, оказываемое поверхностью пузыря на газ, во всех точках поверхности одно и то же. Для изощренного математика условие постоянства давления — источник сложных вычислений формы поверхности пузыря. Такие вычисления нам не по плечу и поэтому, как и в случае пузыря на соломинке, поинтересуемся лишь двумя точками A и B. Они обозначены на рисунке, на котором изображено сечение пузыря на воде плоскостью, проходящей через его ось.



Пузырь на поверхности жидкости



Пузырь на твердой подложке

На соседнем рисунке изображена схема пузыря на твердой подложке. Сравнение двух рисунков должно помочь лучше понять тот, на котором изображен пузырь на воде.

Радиус кривизны в точке A определится уже известным нам условием $\Delta P = 4\alpha/R_A$. А вот для нахождения R_B надо еще учесть, что давление $P_g = \rho g H$, обусловленное столбом жидкости высотой H, суммируется с лапласовским давлением. Гидростатическое и лапласовское давления должны сообща компенсировать избыточное давление газа. При этом в точке B лапласовское давление должно быть вдвое меньшим, чем в точке A, так как оно создается не двусторонней пленкой, а границей газ – жидкость. Теперь можно записать:

$$\Delta P = 2\alpha/R_B + \rho g H.$$

Из наших формул следует соотношение

$$2/R_A - 1/R_B = \rho g H/2\alpha.$$

Мы установили связь между тремя характеристиками формы пузыря на воде: R_A, R_B и H. Пожалуй, этим и удовлетворимся.

Итак, форма пузыря на воде не сферическая, так как $R_A \neq R_B$, и не полусферическая, так как $R_B \neq \infty$. А какая? А такая, которая согласуется с найденной нами связью между R_A, R_B и H. Мы проверяли это в нашей лаборатории. Создавали на поверхности множество пузырей разных размеров, фотографировали их в разных позициях и убедились, что наша формула вполне разумна. Вот примерный набор чисел, определенных в одном из опытов:

$R_A = 10^{-2}$ м, $R_B = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $H \approx 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ м. Они неплохо удовлетворяют последнему соотношению.

Прежде чем закончить рассказ о форме пузыря на воде, я хочу обратить внимание читателя на то, что в солнечный день на пузыре, плавающем на поверхности реки, сияют два блика. Присмотритесь: не один, а два! Один из них – следствие отражения солнечного луча от внешней поверхности пузыря, другой – от внутренней, той, которая ниже уровня воды. Если перемещаться вокруг покоящегося пузыря, блики тоже будут перемещаться. Ясно, что изменение их взаимного расположения определяется формой поверхности пузыря – внешней и внутренней. Солнце можно в лаборатории заменить источником параллельного пучка света. Перемещая источник вокруг покоящегося пузыря на воде и следя за взаимным перемещением бликов, можно получить сведения о его форме.

Объединение двух мыльных пузырей

Обсудить этот процесс безусловно стоит, хотя бы для того, чтобы выяснить, каким образом два объединяющихся пузыря и образующийся при этом третий «заботятся» о том, чтобы связанная с ними энергия понизилась. О ее повышении не может быть и речи, так как в этом случае никакого самопроизвольного объединения не происходило бы.

Итак, задача состоит в том, чтобы найти связь между радиусами R_1 и R_2 двух объединяющихся пузырей и радиусом R_3 пузыря, образующегося при этом. Будем исходить из очевидного утверждения, которое должно стать надежной основой для получения правильного решения задачи: сумма числа молекул газа в первом пузыре и числа молекул во втором равна числу молекул газа в образовавшемся третьем:

$$N_1 + N_2 = N_3.$$

Полное число молекул газа в пузыре радиусом R определяется известной формулой:

$$N = \frac{PV}{kT} = \frac{P_0 + 4\alpha/R}{kT} \cdot \frac{4}{3}\pi R^3.$$

Вот теперь, воспользовавшись определением N и ранее записанным условием сохранения числа молекул газа, мы получим интересующую нас связь между величинами

R_1, R_2 и R_3:

$$\frac{4\alpha}{P_0}=\frac{R_1^3+R_2^3-R_3^3}{R_3^2-R_1^2-R_2^2}.$$

Задача решена, конечная формула получена. Попытаемся теперь извлечь из нее сведения о процессе объединения двух мыльных пузырей. В полученной формуле слева стоит величина заведомо положительная. Следовательно, дробь, стоящая справа, также должна быть положительной, т. е. ее числитель и знаменатель должны быть одновременно либо положительными, либо отрицательными. Легко убедиться в том, что они обязаны быть отрицательными, так как в этом случае оказываются справедливыми два неравенства, свидетельствующие о том, что при объединении пузырей связанная с ними энергия уменьшается. Первое из них следует из отрицательности числителя:

$$R_3^3 > R_1^3 + R_2^3.$$

Это неравенство означает, что при объединении объем пузырей увеличивается, газ расширяется. Это газ делает всегда, когда ему предоставляется такая возможность.

Второе неравенство следует из отрицательности знаменателя:

$$R_3^2 < R_1^2 + R_2^2.$$

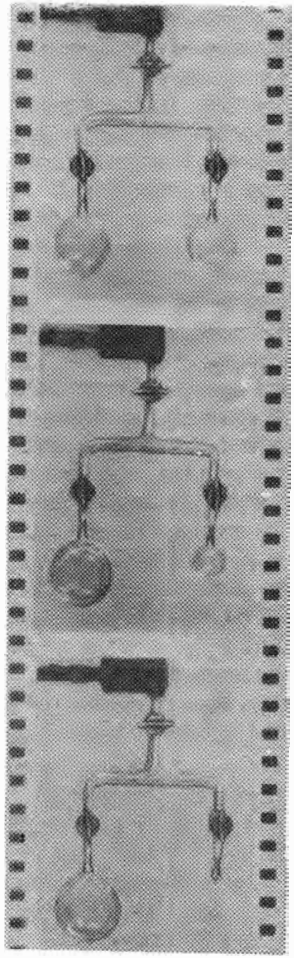
Это неравенство означает, что объединение пузырей сопровождается уменьшением поверхности образующей их пленки. Безусловно, выгодный процесс: уменьшается поверхность — уменьшается и связанная с ней энергия.

Хочу поделиться с читателем чувством радости, которую испытал, увидя обсуждаемую нами формулу. По-моему, она красива тем, что в ней очень четко разделены возможные процессы, происходящие с пузырями: в числителе — все, касающееся газа, а в знаменателе — все, касающееся пленки.

Обсуждаемая формула подсказывает привлекательную возможность: по данным опыта, в котором изучалось объединение двух пузырей, определить величину поверхностного натяжения пленки. Для этого, казалось бы, надо немногое: измерить величины R_1, R_2 и R_3 и поглядеть на манометр, измеряющий атмосферное давление P_0.

Как часто бывает, скоро сказка сказывается, да не скоро дело делается. Такой опыт сопряжен с огромными трудностями, которые связаны с тем, что при

$\alpha \approx 3 \cdot 10^{-2}$ Н/м и $P_0 \approx 10^5$ Па дробь, составленная из величин R_1, R_2 и R_3, должна быть равна $\approx 1{,}2 \cdot 10^{-6}$ м. Это означает, что радиусы пузырей надо измерять с точностью до долей микрометра. Возникшая трудность обусловлена тем, что лапласовское давление несравненно меньше атмосферного для всех пузырей, радиус которых $R \gg 4\alpha/P_0 \approx$ $\approx 10^{-6}$ м. А экспериментировать с пузырями, радиус которых меньше микрометра, чрезвычайно сложно. Складывается такая ситуация: есть возможность теоретически определить α, но нет возможности практически ее реализовать.



Последовательные стадии объединения двух пузырей

Объединение свободно летающих пузырей при их соприкосновении осуществить трудно. Как правило, при объединении пузыри разрушаются прежде, чем разрушается разделяющая их перегородка – мембрана. Она оказывается прочнее пленки пузырей. Можно, однако, поступить по-иному: выдуть два пузыря на концах изображенной на рисунке трубки, а затем следить за тем, как газ из меньшего пузыря, где лапласовское давление больше, будет перетекать в больший пузырь, где лапласовское давление меньше. Такие опыты ставились много раз. Процесс объединения пузырей, т. е. формирование того пузыря, который в нашем очерке называется «третьим», виден отчетливо. В этих опытах величину α мы не измеряли по причине, о которой говорили выше. Для этого есть иные, более доступные методы. А вот, что происходит при объединении двух пузырей, кажется, поняли. Удовлетворимся этим.

Взаимное притяжение соприкоснувшихся мыльных пузырей

Строго говоря, в этом очерке будет речь не только о соприкоснувшихся мыльных пузырях, но и о соприкоснувшихся твердых шариках. И хотя мыльный пузырь и твердый шарик – объекты существенно различные, все же оказалось, что есть роднящее их явление, которое обусловлено тем, что и пузырь, и шарик ограничены сферической поверхностью. Впрочем, по порядку. Вначале – о пузырях: они герои нашей книги.

Мысленно приведем в соприкосновение два равновеликих мыльных пузыря и поразмышляем над тем, что же будет дальше. Первым делом, видимо, следует отчетливо понять, что кроется в слове «соприкосновение». Если при соприкосновении на внешней поверхности каждого из пузырей адсорбционные слои окажутся нетронутыми и если мы не приложим никаких стараний к тому, чтобы эти слои разрушить, соприкоснувшиеся пузыри должны сохранять свою индивидуальность, остаться безразличными друг к другу. Но представим себе, что в момент соприкосновения (или чуть попозже) в месте контакта между пузырями образуется пятачок, по площади которого пузыри не разделены адсорбционными слоями. Ранее образовавшие их молекулы либо ушли в объем пленки, либо оттеснились на контур образовавшегося пятачка, радиус которого x. Появление такого пятачка означает, что на площади πx^2 исчезнут две границы между пузырями, а это в свою очередь означает, что энергия пузырей уменьшилась на величину $\Delta W_S = -2\pi x^2 \alpha$. Обнаружившуюся возможность понижать энергию оба пузыря будут стремиться использовать, прижимаясь друг к другу и увеличивая при этом площадь контакта. Этот эффект, обусловленный стремлением к понижению поверхностной энергии, видимо, можно назвать эффектом капиллярного притяжения.

Попытаемся оценить силу F, с которой два пузыря прижимаются друг к другу, если эта сила обусловлена лишь упомянутой выше причиной – увеличением площади контакта, где нет разделяющих пузыри адсорбционных слоев. Для упрощения нашей задачи предположим, что прижимающиеся пузыри сохраняют сферическую форму и что сближение центров сфер, равное $2h$, пренебрежимо мало по сравнению с начальным расстоянием между центрами, равным $2R$. Позже, когда мы будем обсуждать специально поставленные опыты, окажется, что сделанные нами предположения справедливы лишь на самой начальной стадии процесса. Впрочем, нас, интересующихся лишь оценкой силы F, вполне могут удовлетворить сведения о начальной стадии.

Из приводимого рисунка следует, что

$$R^2 = x^2 + (R - h)^2,$$

а так как $h \ll R$, то $x^2 \approx 2Rh$. Теперь мы можем записать величину, на которую уменьшилась поверхностная энергия двух соприкоснувшихся мыльных пузырей, выразив ее через радиус пузыря R и величину h:

$$\Delta W_S = -4\pi Rh\alpha.$$

Учтя, что работа есть произведение силы на пройденный путь, мы можем написать оценку интересующей нас силы:

$$F = -\Delta W_S / h = 4\pi R\alpha.$$

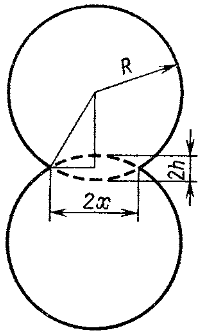
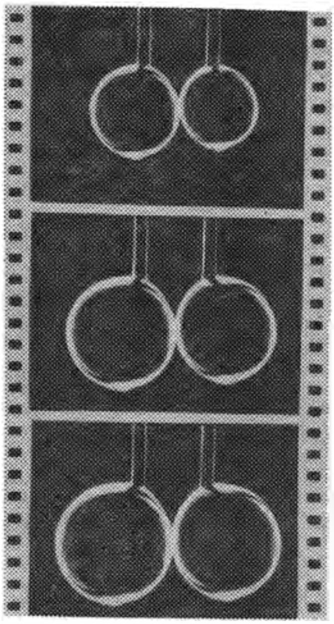


Схема контакта между двумя соприкоснувшимися пузырями

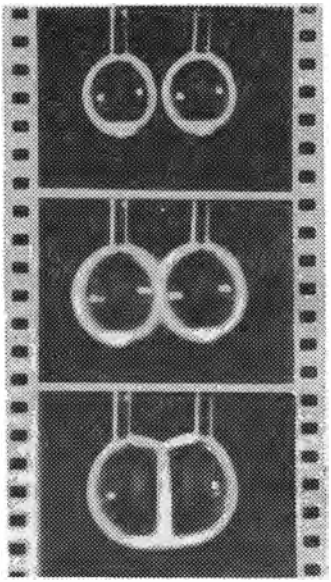
Оказывается, что сила, с которой притягиваются соприкоснувшиеся мыльные пузыри, пропорциональна их радиусу. Этот результат совершенно естествен и является следствием геометрии контакта между сферами, при которой $x^2 \sim R$. И еще одно обстоятельство: сила притяжения не зависит от степени сближения центров сфер. И этот результат – дань геометрии. Он справедлив до тех пор, пока справедливо предположение о малости h по сравнению с R.

Оценим полученную силу. При $R = 10^{-2}$ м, $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-2}$ Н/м оказывается, $F \approx 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ Н. Сила не маленькая. Скажем, легкую пружинку, коэффициент жесткости которой ≈ 2 Н/м, она может сжать более, чем на миллиметр. А теперь обратимся к эксперименту, цель которого убедиться в реальности силы F. Он прост и доступен каждому читателю, который располагает стеклянным тройником. Тройник нужен для того, чтобы можно было одновременно выдувать два идентичных пузыря так, как это изображено на приведенной кинограмме. Увеличиваясь в объеме, они соприкоснутся.

В этот момент надо перестать дуть и начать наблюдать за контактом между пузырьками. Иногда оказывается, что соприкоснувшиеся пузыри сохраняют свою индивидуальность, не объединяются, даже если продолжать их раздувать, явно прижимая один к другому. Это означает, что адсорбционные слои на поверхностях не разрушились и являются границей между соприкоснувшимися пузырями.



Два соприкоснувшихся мыльных пузыря могут сохранять свою индивидуальность



После соприкосновения пузыри могут вдавиться друг в друга. Последовательные стадии процесса

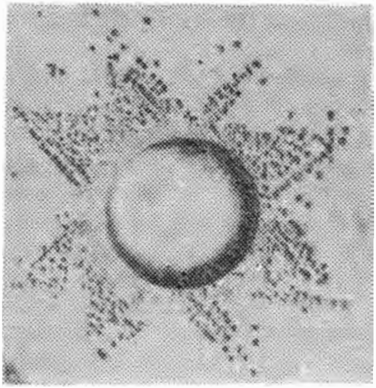
Чаще, однако, происходит иное: какое-то время соприкоснувшиеся пузыри сохраняют сферическую форму, а затем, почти мгновенно, они вдавливаются друг в друга, оказавшись разделенными лишь мембраной и потеряв при этом сферическую форму. Этот процесс отчетливо свидетельствует о реальности обсуждавшейся нами силы F. Иллюстрирующая его кинограмма изображена на рисунке. Здесь, пожалуй, необходимы соображения о том, чем определяется конечный радиус сформировавшейся мембраны $x_к$. Дело в том, что слиянию пузырей сопутствуют два конкурирующих процесса. Во-первых, на площади $\pi x_к^2$ исчезают адсорбционные слои, формируется мембрана и освобождается энергия $2\pi x_к^2\alpha$. Во-вторых, слившиеся пузыри теряют сферическую форму, и при данном объеме газа их поверхность должна увеличиваться и должна увеличиться связанная с ней энергия. Верхний предел значения $x_к$ определится из требования, чтобы энергия взаимно вдавливающихся пузырей не превзошла их энергию до вдавливания.

Необходимо сделать одно существенное замечание. То обстоятельство, что при некотором значении $x_к$ конфигурация соприкоснувшихся и прижатых друг к другу пузырей стабилизуется, означает, что прижимающая сила F скомпенсирована противодействующей ей силой, создаваемой и сжатым газом, и растянутой пленкой. Если бы мы, искусственно прижимая пузыри, т. е. увеличивая силу F, попытались дополнительно сблизить их и таким образом увеличить $x_к$, должна была бы возникнуть сила отталкивания, восстанавливающая форму пузырей. Позже, в следующей главе, мы вспомним об этом замечании.

На этом, пожалуй, закончим разговор о пузырях и обратимся к твердым шарикам. Без дополнительных пояснений понятно, что все соображения о капиллярном притяжении, которые привели нас к оценке силы, прижимающей два мыльных пузыря, справедливы и применительно к сплошным шарикам, изготовленным из твердого вещества, – ионного соединения, металла, стекла. Ведь поверхность твердого тела также обладает определенной энергией и, следовательно, поверхностным натяжением. И та же формула будет определять прижимающую силу с одним, однако, чисто количественным отличием, которое следует иметь в виду, когда шарики изготовлены из кристаллического вещества: величина F пропорциональна не величине 2α, а величине $\Delta\alpha = 2\alpha - \alpha_{гр}$, где $\alpha_{гр}$ – поверхностная энергия контактной границы, которая в случае произвольно ориентированных кристаллических шариков не обязана исчезнуть, как это может происходить в случае мыльных пузырей или шариков из аморфного вещества. Итак, твердые шарики, соприкоснувшись, притягиваются с некоторой силой $F = 2\pi R\,\Delta\alpha$, которая может вызывать их деформацию. В контактной зоне создаются средние напряжения

$$\sigma_к \approx F/\pi x^2 = \Delta\alpha/h.$$

При $\Delta\alpha \approx 10^{-1}$ Н/м и $h \approx 10^{-6}$ м значение $\sigma_к \approx 10^5$ Н/м^2. Эти напряжения могут обусловить упругое сжатие и даже пластическую деформацию в зоне контакта между металлическими шариками или шариком и плоскостью, смять контактную зону. Такой эффект имеет огромное значение, например, в порошковой металлургии. Опыты по притяжению мыльных пузырей следует рассматривать как моделирование важного явления природы — взаимного вдавливания твердых тел, ограниченных выпуклой поверхностью. Физики это явление назвали «самоиндентированием».



На поверхности кристалла NaCl под шариком из этого же кристалла возникают следы искажений решетки кристалла в связи с тем, что шарик вдавливается в него так же, как два мыльных пузыря вдавливаются друг в друга

Моделирование представляется наглядным и, видимо, разумным. Хочется все же понять, почему в каждодневной жизни, имея дело с привычными нам макроскопическими телами, мы практически не сталкиваемся с моделируемым явлением. Почему, например, футбольный мяч не сращивается с землей или не слипается морская прибрежная галька? Почему с двумя соприкасающимися камешками, отполированными волной, не происходит то же, что и с соприкоснувшимися мыльными пузырями? Причина этого заключается в следующем. Дело в том, что эффект взаимного притяжения двух тел при формировании контакта между ними, может наступить лишь после того, как между телами установится контакт «на атомном уровне», когда в случае аморфных тел исчезнет энергия $\sim 2S_0\alpha$, а в случае кристаллических — $\sim S_0\,\Delta\alpha$ (S_0 — площадь контакта). Для того чтобы такой начальный контакт зародился, соприкасающиеся поверхности должны быть «атомно-чистыми», а мы в быту общаемся с телами заведомо «атомно-грязными», покрытыми, например, слоем адсорбированных газов. Атомная чистота соприкоснувшихся поверхностей мыльных пузырей наступает, как мы знаем, лишь тогда, когда в месте их соприкосновения разрушается адсорбционный слой. Допустим, однако, что требующаяся для проявления эффекта «атомная чистота» поверхностей имеется. Это может осуществиться либо в искусственно созданном сверхвысоком вакууме, либо в космосе. Достаточно ли этого, чтобы эффект обнаружился на твердых телах макроскопических размеров? Вообще говоря – достаточно. Однако размер контактной площадки между твердыми телами будет всегда на много порядков меньше их размеров, и вес тел разрушит этот контакт. Впрочем, в невесомости этот контакт может сохраниться.

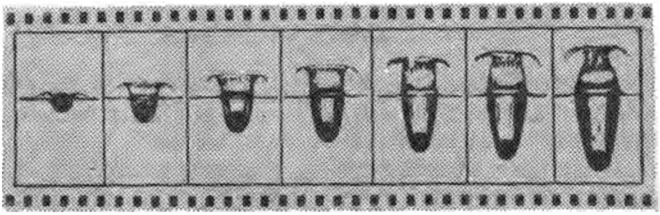
«Лужи вскипали пузырями»

Прижатые к дому обильным майским дождем, мы наблюдали за асфальтом. На нем, мокром и сверкающем, вспыхивали пузыри. Именно вспыхивали: они мгновенно появлялись и, прожив недолгую жизнь, исчезали. Казалось, тучи разрешаются не каплями, а пузырями. И было странно, оторвав глаза от асфальта, не увидеть в воздухе падающие пузыри. Мне вспомнилась строка из когда-то прочитанного стихотворения: «лужи вскипали пузырями». Пузыри были крупными и непоседливыми – они смещались, вздрагивали, поворачивались. Как будто бы, упав с неба, они искали в земной лужице место поудобнее.

Итак – дождь, сопровождающийся появлением пузырей на поверхности луж.

Начиная поиск ответа на вопросы «почему?», «как?» и «когда?» возникают дождевые пузыри на лужах, мы обязаны учитывать одно очень важное обстоятельство. Оказывается, совсем не всегда во время дождя на поверхности луж возникают пузыри. Даже скажем так: пузыри возникают редко. Чаще в месте падения капли на поверхности лужи или реки возникает впадина, которая, выравниваясь, рождает столбик, завершающийся шариком. Вспоминается строка из Дмитрия Кедрина: «серебряный гвоздик с алмазною шляпкой». И все же иногда появляются не гвоздики, а пузыри, рожденные каплей, упавшей на воду.

О том, что происходит, когда под влиянием упавшей капли на поверхности воды зарождается серебряный гвоздик, мы знаем доподлинно, об этом рассказала кинокамера. Капля создает под собой вмятину, которая, распрямляясь, превращается в выпуклость в форме гвоздика. Образование вмятины происходит всегда, какого бы размера ни была капля и с какой бы высоты она ни падала. Даже очень маленькая капля создает вмятину, которая может превратиться в гвоздик. Ну, не в гвоздик, так в выпуклость, не доросшую до гвоздика. Но может оказаться, что упавшая на поверхность воды капля с большим запасом кинетической энергии создает под собой глубокую впадину – канал, что этот канал не распрямится, а схлопнется и превратится в замкнутый пузырек под поверхностью воды. Такой пузырек всплывет, появится над водой и оформится (или может оформиться) в виде



Последовательные стадии начального этапа падения тяжелого шарика в воде

пузыря. Именно такой пузырь иногда мы и видим на поверхности лужи во время дождя.

Во многих лабораториях изучали процесс падения на воду шарика, тонущего в ней. При этом преследовали разные цели. Одна из них – изучить события во время удара, другая – проследить за тем, как шарик тонет, оставляя за собой шлейф пустоты, третья – как этот шлейф схлопывается, распадаясь при этом на подводные пузыри. Такие опыты мы можем рассматривать как моделирование интересующего нас процесса падения капли на воду. Водяной капле, разумеется, тонуть в воде не положено, но создать в воде глубокую вмятину ей под силу. Ведь именно это предшествует появлению отрицательного пузыря. Существенное отличие капли от шарика состоит в том, что упавшая капля может слиться и чаще всего сливается с водой, а металлический шарик с ней не сольется, но это важно лишь на начальной стадии процесса. Если капля сотворила канал, длина которого заметно превосходит его диаметр, он не спрямится, создавая гвоздик. Он схлопнется и образует пузырек.

Если все рассказанное об условиях возникновения пузырька верно, то, в соответствии с народными приметами, можно утверждать, что во время дождя образуются пузыри и побегут по лужам и реке, если падать будут крупные капли. Так или иначе, но «пузырьковый» дождь могут создавать крупные капли с большим запасом кинетической энергии.

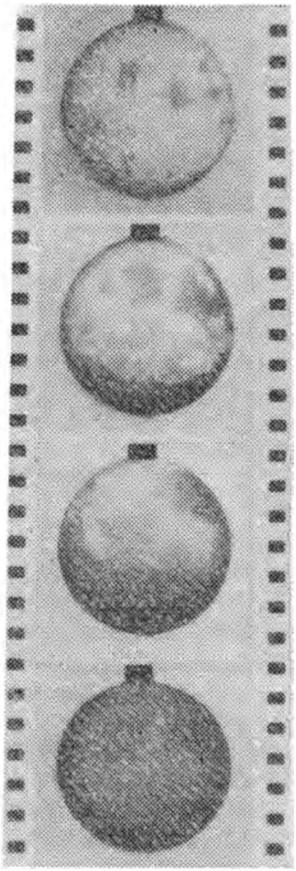
Попытаемся вложить количественную меру в слова «крупные» и «большой запас». Сделаем для этого одну простую оценку, при помощи которой устанавливается связь между длиной цилиндрического канала $l_{кан}$, т. е. тем расстоянием, которое прошла капля, прежде чем, потеряв энергию, слилась с водой, радиусом этого канала, который должен быть немногим больше радиуса капли $R_к$, и радиусом сформировавшегося пузыря $R_п$. Дело в том, что и в открытом канале, и в закрытом пузыре газ находится при практически одном и том же атмосферном давлении. Лапласовская добавка к атмосферному давлению в пузырях, как мы знаем, мала. Это значит, что объем газа в канале и в пузыре, который мы предположили почти полусферическим, должен быть один и тот же. Это обстоятельство дает право записать условие:

$$\pi R_к^2 l_{кан} \approx \frac{2}{3}\,\pi R_п^3, \text{ т. е. } R_к \approx (2R_п^3/3l_{кан})^{1/2}.$$

На поверхности очень мелких лужиц пузыри, как правило, не возникают. Помня это, примем для оценки $l_{кан} \approx 10^{-2}$ м, а радиус пузыря $R_п \approx 5\cdot10^{-3}$ м. Тогда получается, что $R_к \approx 2\cdot10^{-3}$ м. Ну что же, вполне разумная цифра! Она означает, что падающая капля имела радиус того же порядка. И еще одно. Она разумна и потому, что отношение $l_{кан}/R_к \approx 5$. При такой степени вытянутости канала он, конечно же, будет рождать не гвоздик, а, схлопываясь, рождать пузырек. Канал может распасться и превратиться не в один, а в большее число пузырьков. В два, в три пузырька. В этом случае наши оценки немного изменятся. Но ведь это – оценки, а не результат точного расчета, и качественного смысла они при этом не утратят.

Кристаллизация пузыря

Мысль написать этот очерк возникла неожиданно, в очень морозный день, у подъезда соседней школы. Мальчишки с пластиковыми трубочками от шариковых ручек толпились вокруг своего товарища. В варежке он прятал баночку с мыльным раствором. Мальчишки набирали в трубку раствор, выдували пузыри побольше и ждали, когда на морозе пузырь закристаллизуется. На кончике трубочек образовывались большие, сантиметров в пять-десять, почти невесомые ледяные сферы. Доблесть каждого состояла в том, чтобы получить ледяной пузырь побольше, попрозрачнее, чтобы, сохранив, занести его в школьный коридор и посмотреть, как он будет таять, превращаясь в лужицу на полу. А еще хорошо бы умудриться, подув в трубку теплым воздухом, проплавить в ледяной сфере круглое отверстие. Или, с помощью другой свободной трубки, проплавить в ледяной сфере несколько отверстий. Этакая игра: кто больше!



Последовательные стадии процесса кристаллизации мыльного пузыря

В этой игре, к сожалению, по причине возрастного ценза, я участия не принимал, но кристаллизацией мыльных пузырей заинтересовался. Позже, летом, в лаборатории, в камере, искусственно охлаждаемой сжиженным воздухом, мы наблюдали за тем, как пузыри кристаллизуются, пытались повлиять на этот процесс, снимали кинофильм. Ставя опыты по кристаллизации мыльных пузырей, я понял азарт мальчишек. Это действительно азартно: выдувать пузыри и следить за тем, как они кристаллизуются на соломинке, или, оторвавшись от нее, твердеют в свободном полете.

Оказывается, что пузырь, кристаллизующийся на соломинке, вращается. Уже потом, попозже, специально приглядевшись, мы убедились, что и некристаллизующийся тоже вращается. Но когда пузырь вращается в процессе кристаллизации и останавливается, примерзая к трубке, это особенно наглядно.

Вращение пузыря, наверное, можно объяснить так. В объеме пузыря из-за разности температур между различными участками его поверхности возникают внутренние воздушные потоки. Воздушная струя встречает поверхность пузыря под каким-то произвольным углом, а это означает, что должна возникнуть сила, поворачивающая пузырь. И направление потоков, и их расположение в объеме пузыря со временем меняются, а поэтому меняются и скорость, и направление его вращения.

Впрочем, вращение – это не самое интересное наблюдение. Значительно интереснее следить за тем, как зарождаются и растут кристаллики в объеме пленки, образующей пузырь. Этот процесс очень напоминает развитие зимних узоров на запотевшем стекле. Наверное, правильнее было бы говорить, что мы наблюдали просто тот же процесс – кристаллизацию жидкой пленки. В начале процесса видны кристаллики – подобие снежинок. А затем отчетливо проявляются контуры растущих ледяных деревьев, переплетающихся ветвями. Ветви утолщаются, расширяются и закрывают собой все зазоры между ними. А в ином месте можно усмотреть контур лепестка розы. Как сказал поэт:

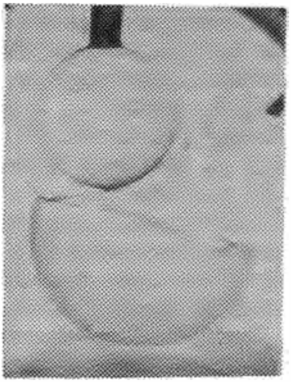
Пейзаж тропического лета
Рисует стужа на окне.
Зачем ей розы? Видно это
Зима тоскует о весне.

Дмитрий Кедрин

А теперь вернемся к кристаллизующимся пузырям. Уместны два замечания о механических свойствах закристаллизовавшейся пленки пузыря.

Во-первых, пленка оказывается не хрупкой, какой, казалось бы, должна быть тонкая корочка льда. Если дать возможность мыльному закристаллизовавшемуся пузырю упасть на пол, он не разобьется, не превратится в звенящие осколки, как стеклянный шарик, каким украшают елку. На нем появятся вмятины, отдельные обломки закрутятся в трубочки. Пленка оказывается не хрупкой, она обнаруживает пластичность.

Пластичность пленки оказывается следствием малости ее толщины. Эту фразу можно было бы подробно разъяснить, привлекая совсем непростые современные представления о механизме пластической деформации. Вспомним лишь об одном механизме – он прост и нагляден. По толщине тонкой поликристаллической пленки располагается, как правило, лишь одно зерно (монокристаллик). При действии на такую пленку деформирующих усилий каждое из составляющих ее зерен может почти беспрепятственно скользить относительно соседей, обусловливая таким образом ее пластичность. В нашем случае этот механизм может оказаться очень существенным, так как вдоль границ между соседними зернами могут находиться тонкие жидкоподобные прослойки, обогащенные молекулами мыла, которые, как известно, понижают температуру кристаллизации воды. Такие прослойки облегчают взаимное скольжение зерен.



Закристаллизовавшийся мыльный пузырь подобен яичной скорлупе

Кроме того, пленка, образующая закристаллизовавшийся пузырь, обнаруживает немалую прочность. Действительно, воздух, находящийся в объеме пузыря, градусов на пятьдесят холоднее того, который мы выдохнули, раздувая пузырь. Это значит, что, когда воздух остывал, давление в объеме пузыря падало. А когда весь воздух остынет, пленка пузыря окажется под сжимающим давлением $\Delta P = P_0 - P = P_0 \Delta T/T_0$, где $P_0 \approx 10^5$ Па — давление в жидком пузыре, которое практически совпадает с атмосферным давлением, $T_0 \approx 310$ К — начальная температура выдохнутого нами воздуха в жидком пузыре, $T \approx 260$ К — температура воздуха в пузыре после его кристаллизации, $\Delta T = T_0 - T$. Таким образом, $\Delta P \approx 1{,}7 \cdot 10^4$ Па. Закристаллизовавшийся сферический пузырь выдерживает сжимающее давление, близкое к 0,2 атмосферного. Скажем точнее так: такое давление он должен выдерживать. И здесь же сделаем два уточнения: если тело пленки герметично и если пузырь остывал, будучи замкнутым, оторвавшись от трубки, через которую его раздували.

Элементарная теория разрушения пузыря

Пузырю, который живет держась за соломинку, угрожает многое: он может лопнуть под тяжестью водяной капли, образовавшейся в низу пузыря, его может порвать поток воздуха, его может проколоть пылинка, случайно севшая на поверхности пузыря. Построить теорию разрушения пузыря, учитывающую все угрозы его жизни, невозможно, так как и угроз много и способам их осуществления несть числа. Но если задачу сузить и интересоваться лишь одной из возможных угроз, можно построить элементарную теорию разрушения пузыря. Вот именно это мы и попытаемся сделать, приняв следующий диагноз: гибель пузыря наступила из-за того, что на его поверхность села пылинка и проколола пленку пузыря, образовав в нем пробоину. По какой причине именно этот диагноз, а не иной? Просто потому, что проще всего обсудить именно его последствия, другой причины нет.

Итак, если все дело в пылинке, случайно осевшей на поверхность пузыря, его гибель окажется тем вероятнее, и, следовательно, длительность его жизни τ будет тем меньше, чем больше поверхность пузыря. Если оседание пылинки происходит случайно, то вероятность ее оседания на поверхность пузыря должна быть пропорциональной площади этой поверхности $S = 4\pi R^2$. Сказанное можно записать так:

$$\tau \backsim 1/S \backsim 1/R^2.$$

Эту закономерность, описывающую зависимость долговечности пузыря от его радиуса, мы пытались проверить экспериментально. К работе по проверке закона я привлек школьников – слушателей моей лекции о пузырях. После лекции мы подробно поговорили о том, как надо ставить опыт, договорились о составе раствора, из которого следует выдувать мыльные пузыри, и прочих условиях опыта. Точно закон $\tau \backsim 1/R^2$ не обнаружился, но все же приближенно он выполнялся, свидетельствуя о том, что в принятых условиях опытов наш диагноз не лишен смысла.

Теперь попробуем описать процесс разрушения случайно проколотого пузыря. В том месте, где пузырь проколот, возникает пробоина, которую мы будем считать гибельной для пузыря.

Для того чтобы выяснить условия, при которых пробоина будет действительно гибельной, т. е., возникнув, будет самопроизвольно расширяться, надо представить себе боковую поверхность пробоины. Она непроста и имеет форму кругового цилиндра, боковая поверхность которого изогнута так, как это показано на рисунке.

Такую поверхность следует характеризовать двумя радиусами кривизны: r и $h/2$. Каждый из радиусов определяет лапласовские давления, из которых одно ($P_{\rightarrow} = 2\alpha/h$) способствует расширению, а другое ($P_{\leftarrow} = \alpha/r$) – сжатию пробоины. Ее судьба зависит от соотношения величин $P_{\rightarrow}$ и $P_{\leftarrow}$: если $P_{\rightarrow} > P_{\leftarrow}$,– пробоина будет расширяться, а если $P_{\rightarrow} < P_{\leftarrow}$,– пробоина будет залечиваться, схлопываться. Для пузыря будут смертельными те пробоины, у которых $r > h/2$. Если, например, $h = 10^{-7}$ м, то появление пробоины радиусом $r > 5 \cdot 10^{-8}$ м означает гибель пузыря.

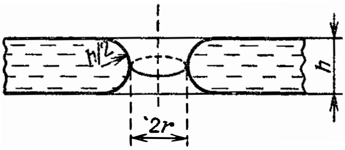
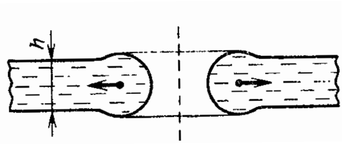
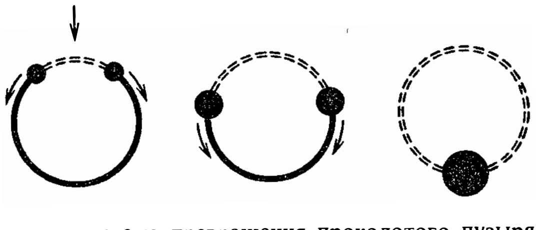


Схема прокола мыльной пленки



По контуру расширяющегося отверстия пленки формируется валик

Итак, допустим, что $P_{\rightarrow} \gg P_{\leftarrow}$. В этом случае отверстие начнет расширяться под влиянием давления $P_{\rightarrow}$, которое будет вынуждать вещество пленки пузыря двигаться от центра отверстия. Предположим простейший процесс: масса той части пленки, которая ранее была на месте расширяющегося отверстия, свернется в бублик, обрамляющий контур отверстия и убегающий от его центра. Со временем отверстие будет расти, а масса бублика будет увеличиваться.



Идеализированная схема превращения проколотого пузыря в каплю

Здесь картина разрушения требует уточнения. Если движущийся бублик будет сохраняться, процесс завершится образованием одной круглой капли. Может произойти иное: бублик будет распадаться на множество капель. Учесть влияние распада бублика на капли на процесс разрушения пузыря очень непросто. Мы лишь попытаемся вычислить время, необходимое для разрушения пузыря, полагая при этом, что бублик сохраняет свою целостность. Не исключено, что такое предположение далеко уведет нас от правды и наша теория за предельную простоту будет расплачиваться ошибочностью. Не исключено! На этот случай существует эксперимент, и он решит, далека или не далека от правды наша теория.

Исчезновение части пленки приводит к освобождению поверхностной энергии, которая, будем считать, превращается в кинетическую энергию движущегося бублика.

Оценим поверхностную энергию ΔW_S, освобождающуюся вследствие возникновения в пленке пробоины, имеющей форму цилиндра радиусом r и высотой h. При этом исчезают две торцевые поверхности общей площадью $2\pi r^2$ и появляется боковая поверхность площадью $2\pi rh$. Таким образом,

$$\Delta W_S = 2\pi\alpha r(r-h) \approx 2\pi r^2\alpha.$$

Мы сочли, что $r \gg h$. Это становится справедливым практически сразу же после начала развития пробоины. Мы еще не учли некоторое увеличение поверхности, связанное с формированием бублика по контуру пробоины. Оно невелико и на нашу оценку ΔW_S влияет мало. К тому времени, когда радиус отверстия достигнет величины r, масса бублика станет $m = \pi r^2 \rho h$. Равенство кинетической энергии бублика и освободившейся поверхностной энергии означает, что

$$mv^2/2 = \pi r^2 h\rho v^2/2 = 2\pi r^2\alpha$$

и, следовательно, бублик будет расширяться со скоростью

$$v = 2(\alpha/h\rho)^{1/2}.$$

Мы получили результат, который вначале немного озадачивает: бублик расширяется с постоянной скоростью. Кажется странным: его масса растет, а скорость движения при этом остается неизменной. Причину понять легко; она заключается в том, что кинетическая энергия бублика пропорциональна его массе, т. е. величине r^2. Величине r^2 пропорциональна и освобождающаяся поверхностная энергия.

Итак, бублик совершает равномерное движение, и путь, равный длине полуокружности экваториального сечения пузыря, который бублик должен пройти, чтобы пузырь превратился в каплю и полностью исчез, будет преодолен за время

$$\tau \approx \pi R (h\rho/4\alpha)^{1/2}.$$

Время τ и является временем, необходимым для разрушения пузыря. Из оценки следует, что пузырь, радиус которого $R = 10^{-2}$ м, образованный пленкой, толщиной $h \approx 10^{-7}$ м, должен разрушиться за время $\tau \approx 5 \cdot 10^{-4}$ с. Так что ясно, что в таких наблюдениях без скоростной фотографии не обойтись.

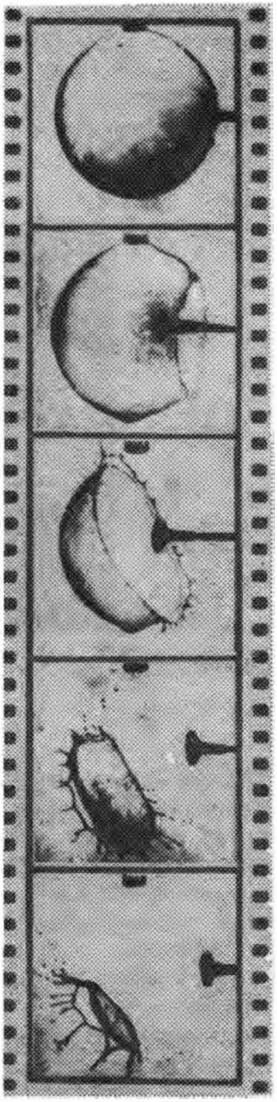
Итак, теория построена. Теперь о фактах. Известны два великолепных опыта, с результатами которых можно сопоставить предсказания нашей элементарной теории. Один из этих опытов был поставлен американским ученым В. Ранцем, другой – советским ученым М. О. Корнфельдом.

В. Ранц проверял, действительно ли при разрушении жидкой пленки образуется валик, который движется с постоянной скоростью. На жесткий обод он натягивал тонкую мыльную пленку, прокалывал ее и следил за тем, как со временем меняется радиус отверстия в ней. Он убедился, что валик действительно образуется и радиус отверстия меняется с постоянной скоростью. Этого, пожалуй, уже достаточно, чтобы счесть, что за упрощение реальной ситуации наша элементарная теория явно не рассчитывается грубой ошибочностью. Экспериментатор определил скорость движения валика и, зная толщину пленки, вычислил коэффициент поверхностного натяжения жидкости по формуле $\alpha \approx h\rho v^2/4$, которая представляет собой записанную в ином виде формулу для скорости движения валика. Концы с концами сошлись, значение поверхностного натяжения оказалось разумным.

Результат опыта Ранца не противоречит основной идее элементарной теории разрушения пузыря, но окончательным количественным ее подтверждением служить не может, так как измерения проводились с пленкой, а не с пузырем и образования конечной капли Ранц не наблюдал. От элементарной теории, пожалуй, большего требовать и не следует.

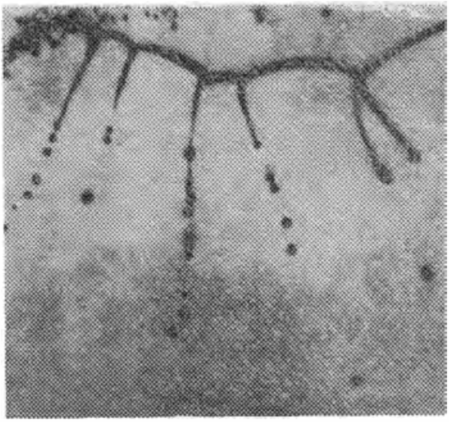
М. О. Корнфельд количественных измерений не производил, но зато тщательно проследил за тем, что́ происходит с пузырем от момента прокола до его полного исчезновения. С помощью специального приспособления он пробивал пленку пузыря и, воспользовавшись техникой фотографирования в импульсном режиме, получил фотографии разрушавшегося пузыря на всех стадиях его исчезновения. Оказалось, что вначале все происходит в согласии с предположениями, которые положены в основу элементарной теории: отверстие расширяется, и вдоль его контура образуется валик. Однако где-то на полпути обнаруживаются «сопутствующие» процессы, не учтенные теорией. От валика отделяются водяные стерженьки, которые, как и полагается стерженькам, распадаются на отдельные капли. Оказывается, что, предполагаемая теорией, одна крупная капля не возникает, а возникает их великое множество. Создается впечатление взрыва, порождающего капли – осколки. Фотографии Корнфельда великолепно это иллюстрируют.

Хочется обратить внимание еще на одно «сопутствующее» явление, которое прекрасно видно на фотографиях и качественно объясняется полученными ранее формулами. Толщина пленки висящего на соломинке мыльного пузыря, вследствие стекания жидкости под влиянием силы тяжести, внизу немного больше, чем вверху. Так как скорость движения валика $v \sim 1/h^{1/2}$, то в нижней части валик движется медленнее, чем в верхней. Это приводит к по-



Последовательные стадии разрушения мыльного пузыря с «пробоиной» вороту отверстия в проколотом пузыре. Поворот относительно соломинки плоскости, в которой расположен валик, отчетливо виден на фотографиях.

В появлении большого количества капель при разрушении пузыря можно убедиться средствами более доступными, чем те, которые использовал Корнфельд.



Жидкие иглы на контуре разрушающегося пузыря превращаются в капельки

Можно предпринять следующий предельно простой эксперимент. Быстрым движением рассечь воду рукой. Вскоре на поверхности воды возникает много пузырей. Если приблизить к ним сухую руку, она покроется множеством маленьких капель – их число значительно больше, чем число пузырей, которые лопнули под ладонью.

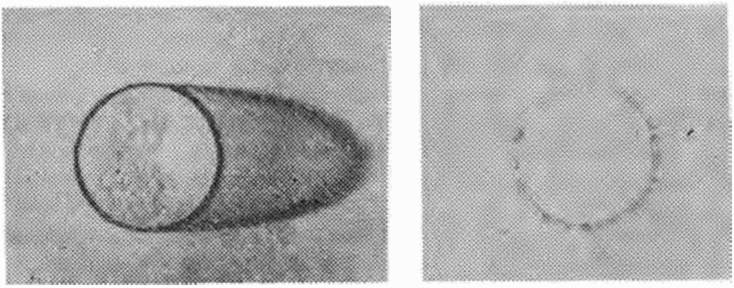
Явление оказалось богаче нашей фантазии. После опытов Корнфельда появились основания для построения более точной и строгой теории. Впрочем, и наша элементарная теория не так уж плоха: Ранц подтвердил разумность предположения об образовании и движении валика при разрушении плоской пленки, а Корнфельд показал, что на начальной стадии разрушения пузырь себя ведет как плоская пленка.

Можно было бы обсудить и иной диагноз. Например, такой: под влиянием силы тяжести в пленке покоящегося пузыря жидкость стекает вниз. При этом верхняя часть пленки пузыря утоняется и может прорваться под тяжестью утолстившейся нижней части пузыря. Диагноз разумный, так как стекание жидкости в пленке пузыря — явление, которое отчетливо наблюдается экспериментально. О нем рассказано далее.

Можно было бы указать и иные возможные причины гибели пузыря. Ограничимся рассказанным.

Два опыта по разрушению пузыря

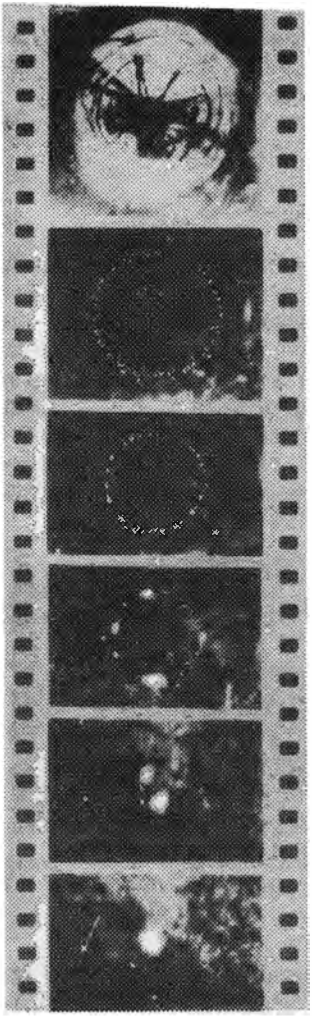
В предыдущем очерке, который, как и этот, посвящен разрушению пузыря, мы пришли к тривиальному заключению о том, что в данном случае, как и во многих других, реальность оказывается богаче фантазии. В этом очерке я хочу рассказать о двух опытах, которые дорисуют реальную картину разрушения пузыря. Она красива, необычна, и знакомство с ней доставит и эстетическую радость, и радость познания. Радости, как известно, обладают свойством аддитивности, они суммируются.



Мыльный пузырь, лопнув на стекле, превращается в совокупность капель и брызг, расположенных по кругу (за целым пузырем видна тень)

Опыты посвящены наблюдению над тем, как разрушается пузырь на стекле или на поверхности воды. Опыты очень просты, любой читатель сможет их повторить самостоятельно. Они удаются, как правило, с первой попытки.

Итак, опыт первый. На поверхности тщательно отмытого и насухо протертого стекла располагается мыльный пузырь. Не маленький, радиусом $R_п \simeq 2 \cdot 10^{-2}$ м. Он — объект нашего опыта. Конструкция пузыря изображена на рисунке (см. также с. 36). Под почти полусферическим пленочным сводом — тонкая жидкая пленка.



Мыльный пузырь, лопнув на поверхности жидкости, образует совокупность расположенных по кругу маленьких пузырьков, движущихся к центру круга

Собственно, та часть опыта, которая требует от нас экспериментального мастерства и инициативы, на этом завершена. Теперь нам предстоит просто наблюдать за объектом исследования – пузырем на стекле.

Вначале с ним будет происходить нечто ожидаемое и естественное. Нижняя часть пузыря будет утолщаться, центральная, верхняя – утоняться. Это отчетливо видно по потокам жидкости, меняющим пятнистую окраску пузыря. В какой-то момент пузырь лопнет. Как правило, очаг разрушения окажется в верхнем, самом тонком месте пленочного свода. А затем, наблюдая за пузырем глазом, а не скоростной кинокамерой, мы пропустим все промежуточные стадии процесса и увидим лишь заключительную: пузырь превращается в совокупность капель. Капли расположены по периметру лопнувшего пузыря, от капель в радиальных направлениях – брызги. Это изображено на фотографии. Если не ожидать самопроизвольного «центрального» разрушения пузыря, которое может произойти вследствие утонения верхней части пузыря, а ударом иглы разрушить его где-то на боковой поверхности, – расположение капель и брызг окажется несимметричным.

Поставим теперь второй опыт, а затем совместно обсудим результаты обоих опытов.

На поверхности мыльного раствора расположим мыльный пузырь и будем наблюдать за его судьбой. В какой-то момент пузырь лопнет. Как и живущий на стекле, этот тоже, как правило, лопается в вершине пленочного свода. После разрушения пузыря вдоль его периметра на поверхности мыльного раствора возникают пузырьки, расположенные по кругу. Вначале радиус этого круга оказывается таким же, как и радиус круглого основания исчезнувшего пузыря, а затем он начнет медленно уменьшаться.

Вот, собственно, и все, что следовало рассказать о двух несложных опытах по разрушению мыльных пузырей. Попробуем теперь сопоставить и осмыслить сделанные наблюдения. Пузырь, лопнув на стекле, превратился в совокупность расположенных по кругу капель и радиальных брызг. Естественно процесс разрушения пузыря представить себе так, что лопнувший пузырь распался на совокупность нитей, расположенных по меридианам, каждая из которых собралась в каплю, упавшую на стекло. Именно упавшие капли и родили брызги. Видимо, мы не ошибаемся в своем предположении о появлении капель, падающих на поверхность, на которой расположен пузырь, так как их появление очень естественно объясняет, почему по периметру пузыря, лопнувшего на воде, возникают пузырьки. Так и должно быть, как при дожде, когда капля падает на поверхность лужи. В нашем опыте возникшие пузырьки как бы обрисовали те точки, на которые падали капли.

Возникновение валика вокруг отверстия – явление нам уже знакомое, а его распад, дающий начало превращению пузыря в нити вдоль меридианов пленочного свода,– это нечто новое, требующее объяснений. Впрочем, этот распад виден на последних кадрах кинограммы, приведенной в предыдущем очерке.

Возникает первый вопрос: почему валик должен распасться на капли? Не рискуя ошибиться, можно утверждать, что такой распад должен быть энергетически выгодным. Видимо, совокупность образующихся капель имеет меньшую поверхность, а значит, и связанную с ней энергию, чем родивший их валик.

Для того чтобы сказанное обрело основание, решим совсем простую задачу о целесообразности распада цилиндрического столбика жидкости на две сферические капли. Если обозначить радиус цилиндра $R_ц$, его высоту $H_ц$, а радиус капель $R_к$, то распад может произойти, если окажется, что поверхность цилиндра больше поверхности двух капель:

$$2\pi R_{ц}^{2}+2\pi R_{ц}H_{ц}>2\cdot 4\pi R_{к}^{2}$$

при условии, что объемы цилиндра и капель равны

$$\pi R_{ц}^{2}H_{ц}=2\cdot\frac{4\pi R_{к}^{3}}{3}.$$

Из этих двух условий следует (читатель в этом убедится сам), что цилиндр будет самопроизвольно распадаться на две капли, если $H_{ц}/R_{ц}\approx 6$ *). При бо́льших значениях $H_{ц}/R_{ц}$ цилиндр будет распадаться на три, четыре и более капель. Именно это и происходит с валиком, который движется от вершины к подножью пузыря. Простым расчетом читатель легко убедится в том, что, сместившись от вершины купола на малую долю радиуса пузыря, валик приобретает периметр, который в сотни раз превосходит радиус валика.

Каждая из капель растет за счет пленки пузыря. Из приводимых фотографий следует, что у подножья пузыря число капель $n=40-50$. Пусть толщина пленки $h\approx\approx 10^{-7}$ м. Объем каждой из капель $V_{к}=2\pi R_{п}^{2}h/n$, следовательно, ее радиус $R_{к}\approx(3R_{п}^{2}h/2n)^{1/3}\approx 10^{-4}$ м.

Диффузионное увядание пузыря

Для того чтобы пузырь оказался долгожителем, его следует искусственно оградить от всех опасностей, которые могут прекратить его существование. Ограждать его надо от такого множества опасностей, что сделать это мы можем лишь чисто умозрительно.

Итак, предположим, что никакие потоки газа в объеме пузыря и потоки жидкости в объеме пленки не могут явиться причиной ее разрыва. Предположим, что пузырь находится в совершенно беспыльной атмосфере и, следовательно, никакая шальная пылинка не может его проколоть. Предположим, что он находится в атмосфере такой влажности, при которой испарение пленки пузыря исключено. Что еще надо предположить? Вот что! Предположим, что пузырь находится в термостате, где нет никаких

---

*) Ранее, обсуждая судьбу цилиндрического канала в воде, мы подобную оценку упоминали.

колебаний температуры, которые могли бы ему повредить. В таких условиях, казалось бы, живи и живи! А в действительности и при такой тепличной жизни пузырь должен увядать, сжиматься. Причина естественного увядания пузыря заложена в его конструкции.

Речь идет вот о чем. Давление газа в объеме пузыря, как известно, больше, чем вне его на величину $P_Л = 4\alpha/R$. Известно также, что растворимость газа в жидкости тем больше, чем больше его давление вблизи поверхности жидкости. Это означает, что в пленке пузыря вблизи ее внутренней поверхности растворенного газа больше, чем вблизи внешней поверхности. Под влиянием разности концентраций растворенного газа $\Delta c = c_1 - c_2$ в пленке должен поддерживаться диффузионный поток газа из объема пузыря во вне. Теряя газ, пузырь будет уменьшать свой радиус, постепенно увядать, схлопываться.

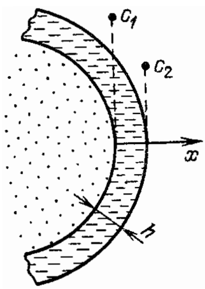


Схема к расчету «диффузионного долголетия» пузыря

Скорость обсуждаемого процесса определяется потоком газа $\dot{J}_г$ сквозь пленку. Этот поток пропорционален перепаду концентрации в пленке, а также площади поверхности пузыря S, т. е. $\dot{J}_г \sim \dfrac{\Delta c}{h} S$, где h – толщина пленки. С изменением R изменяются и Δc, и h, и S. Величина $\Delta c \sim P_Л \sim 1/R$, а зависимость h от R следует из условия постоянства объема пленки: $R^2 h = \mathrm{const}$, т. е. $h \backsim 1/R^2$. Площадь поверхности пузыря $S \backsim R^2$. Таким образом, $\dot{J}_г \backsim R^3$. Это означает, что естественное увядание пузыря с уменьшением его радиуса должно замедляться.

Обсуждаемой «диффузионной» причины увядания пузыря избежать невозможно. Разве что каким-нибудь искусственным приемом сделать пленку непроницаемой для газа или подобрать такой газ, для которого пленка пузыря непроницаема. Если этим пренебречь, если считать, что сквозь пленку мыльного пузыря молекулы газа перемещаются так же, как и в обычной воде – увядание пузыря неизбежно.

Задачу о диффузионном увядании пузыря, т. е. о том, как со временем уменьшается его радиус вследствие диффузии газа сквозь пленку, решить не очень сложно. Мы, однако, делать этого не станем, а запишем лишь результат такого расчета.

Оказывается, что

$$R = R_0 e^{-t/\tau},$$

где R_0 — начальный радиус пузыря, которому предстоит увядать, τ — характерное «время увядания», в течение которого увядающий пузырь уменьшит свой радиус в $e \approx 2{,}72$ раз. Действительно, при $t = \tau$ оказывается, что $R = R_0/e$, а при $t = n\tau$, $R = R_0/e^n$. Приведенная зависимость радиуса увядающего пузыря от времени называется экспоненциальной. В ее основе лежит следующая физическая закономерность: чем больше радиус пузыря, тем быстрее он уменьшает свой радиус.

Получается (это следует из расчета), что для обычного мыльного пузыря в воздухе $\tau = AR_0^2 h_0$, где A — размерный множитель ($A = 3 \cdot 10^{16}$ с/м^3). Очень интересный результат! Оказывается, что «время увядания» при прочих неизменных условиях определяется объемом капельки жидкости $V = 4\pi R_0^2 h_0$, использованной при создании пузыря. Еще раз — то же самое, но иными словами: все пузыри, для которых значение $R_0^2 h_0$ одинаково, имеют одно и то же «время увядания». Оно оказывается немалым. При $h_0 \approx 10^{-8}$ м и $R_0 \approx 5 \cdot 10^{-3}$ м значение $\tau = 7 \cdot 10^3$ с. А при $h_0 \approx 10^{-7}$ м и $R_0 \approx 10^{-2}$ м значение $\tau = 3 \cdot 10^5$ с.

В конце очерка следует сделать замечание о том, насколько существенно наше предположение, что проницаемость пленки для газа такая же, как и проницаемость жидкости, из которой пленка состоит. В действительности, проницаемость пленки может оказаться значительно меньше проницаемости жидкости. Это связано с тем, что адсорбированный на поверхности пленки слой чужих молекул, например молекул мыла, окажется в роли очень высокого барьера, который препятствует и проникновению газа в пленку, и выходу газа из нее. В этом случае τ может оказаться еще большим, чем то, которое мы оценили, пренебрегая процессами на поверхности пленки пузыря.

Естественное диффузионное увядание пузыря, как правило, нарушается «жизненными обстоятельствами» в виде гравитации, пылинок, потоков воздуха и др. И все же, по-моему, стоило обсудить и эту сторону жизни пузыря — его «естественное увядание», даже и в том случае, если оно протекает не до конца и очень медленно.

Мыльный пузырь падает на пол

Мыльному пузырю, заполненному воздухом, надлежит падать, так как он заведомо тяжелее воздуха. Тяжелее по той очевидной причине, что объем вытесняемого им воздуха практически такой же, как и объем воздуха, заключенного в нем. И давление, и температура воздуха вне пузыря и в пузыре практически совпадают. В среднюю плотность пузыря образующая его пленка вносит вклад $\Delta\rho = 4\pi R^2 \rho_{вод} h / \frac{4}{3} \pi R^3 = 3\rho_{вод} h/R$. При $h/R \approx 10^{-5}$ значение $\Delta\rho \approx 3 \cdot 10^{-2}$ кг/м^3. Добавка малая, значительно меньше плотности воздуха $\rho_{воз} = 1{,}3$ кг/м^3, но все же это добавка к $\rho_{воз}$ и, значит, пузырь должен падать.

Заключение, к которому мы пришли, особой глубиной не отличается, оно самоочевидно. А вот малость значения $\Delta\rho$ представляет интерес. При столь малой добавке на движение мыльного пузыря должны сильно влиять не только сила тяжести, но и сопротивление воздуха, и слабые потоки воздуха, искажающие прямолинейный путь падающего пузыря.

В покоящемся воздухе, не возмущенном никакими посторонними воздушными потоками, пузырь должен бы падать под действием разности сил: силы тяжести $F_\downarrow = 4\pi R^2 h \rho_{вод} g$, вынуждающей движение пузыря, и силы $F_\uparrow$, имеющей смысл силы сопротивления воздуха падающему пузырю:

$$F = F_\downarrow - F_\uparrow.$$

Здесь необходимо уточнение. Дело в том, что, согласно закону Ньютона, под влиянием действующей постоянной силы тело должно двигаться с ускорением, равным отношению этой силы к массе тела. Если тело движется в среде – газе или жидкости, то кроме силы, вынуждающей движение, возникает сила, оказывающая ему сопротивление. С ростом скорости движущегося тела сопротивление возрастет и, когда будет достигнуто равенство сил, тело будет двигаться с постоянной скоростью.

Попробуем оценить скорость, с которой сила $F_\downarrow$ вынуждает падать мыльный пузырь. Для этого необходимо представить себе, что происходит в воздухе, когда в нем движется падающий пузырь, большой и легкий, и оценить тормозящую силу $F_\uparrow$.

Необходимо вложить физическое содержание в слово «падать». Мы это сделаем, очень упростив реальную ситуацию, подробно не прослеживая судьбу воздуха, который пузырь лобовой поверхностью отталкивает со своего пути. Решим так: отталкивает, пробивает себе путь — и всё тут! А воздух, убранный пузырем со своего пути, место себе найдет! Правильно или ошибочно наше решение, далеко или недалеко оно уводит нас от правды,— об этом чуть позже (в этом очерке) мы спросим у опыта, а еще позже (в очерке «Пузырек всплывает в жидкости») мы найдем и формальное оправдание нашему решению. А сейчас, ведомые интуицией и вынуждаемые неумением решить задачу точно, решим ее приближенно, учтя лишь отталкивание воздуха пузырем.

Попытаемся теперь оценить скорость свободного падения мыльного пузыря в воздухе. Ему, падающему, препятствует сила $F_\uparrow$, действующая на пузырь со стороны воздуха. Оценить ее несложно. Двигаясь со скоростью v и пройдя путь l, пузырь передаст массе воздуха $m = \pi R^2 l \rho_{\text{воз}}$ энергию $W = F_\uparrow l = mv^2/2 = \pi R^2 \rho_{\text{воз}} l v^2/2$. Это означает, что $F_\uparrow = \pi R^2 \rho_{\text{воз}} v^2/2$. Согласно закону Ньютона, если пузырь падает с постоянной установившейся скоростью, должно выполняться условие $F_\downarrow = F_\uparrow$, из которого следует формула, определяющая скорость падения пузыря:

$$v = 2^{3/2} (hg\rho_{\text{вод}}/\rho_{\text{воз}})^{1/2} \sim h^{1/2}.$$

Итак, выясняются два важных обстоятельства: во-первых, скорость падения мыльного пузыря не должна зависеть от его радиуса, а, во-вторых, она должна зависеть от толщины по закону $v \sim h^{1/2}$. Зависимость $v \sim h^{1/2}$ экспериментально проверить совсем не просто, во всяком случае в школьной лаборатории. А вот экспериментально убедиться в независимости v от R сравнительно просто.

Для того чтобы поставить опыт по падению пузырей, надо научиться получать пузыри без отягощающих их капель, которые всегда получаются, если выдувать пузырь сквозь соломинку. Для таких опытов мы получили пузыри другим способом. Из проволоки делали кольцо с диаметром отверстия $2 \cdot 10^{-2}$ м, прикрепляли к нему ручку и окунали кольцо в мыльный раствор с малой добавкой глицерина. После удаления кольца из раствора оно оказывалось затянутым мыльной пленкой. Если на эту пленку подуть, она превращается в несколько идеальных мыльных пузырей разных размеров. Затем следили за падением пузырей. Чтобы падение пузырей не искажалось посторонними потоками воздуха, пространство, где падали пузыри, ограждалось экранами.

Оказалось, что различные пузыри падают с немного различными скоростями, при этом никакая систематическая зависимость v от R себя не обнаруживает. Наблюдавшиеся скорости падения различных пузырей колебались вокруг среднего значения 0,15 м/с. Получавшееся различие в скоростях, видимо, определялось различием в толщинах пленок пузырей. Итак, успех! Предсказали отсутствие зависимости v от R и убедились в том, что она действительно отсутствует.

Из полученного в опыте среднего значения скорости находим по формуле толщину его пленки. Получается $h \approx 5 \cdot 10^{-7}$ м. Как известно, именно такова толщина пленки пузырей, которые имеют окраску. О ее причине поговорим в следующем очерке, а здесь обратим внимание на еще один успех, на этот раз количественный: наша формула дает возможность по скорости падения пузыря оценить толщину пленки, которой он образован. Видимо, наше решение учесть в расчете скорости v только отталкивание воздуха пузырем увело нас не очень далеко от правды. Точнее даже так: если и увело, то очень недалеко.

Экспериментаторы тщательно избегали различных воздушных течений, которые могли бы исказить падение мыльного пузыря: и в рассуждениях избегали, и в опытах избегали, воспользовавшись экранами, которые ограждали пузырь от воздушных потоков. Теперь нам понятно, что восходящий поток воздуха со скоростью около $v \approx 0{,}15$ м/с может остановить падение пузыря и даже вынудить его взлететь, удаляясь от пола. Сделайте простой опыт. Выдуйте мыльный пузырь вблизи отопительной батареи и вы увидите, что ваш пузырь будет «падать» на потолок.

Оптика мыльного пузыря

Всякий раз, когда вспоминают о мыльных пузырях, неизменно заходит разговор об их цвете или, точнее, об их цветах, или еще точнее – об их расцветке. Вот и С. Я. Маршак, в тех стихах, строки из которых напутствовали нашу книгу, восторгается расцветкой пузыря:

Горит, как хвост павлиний,
Каких цветов в нем нет!
Лиловый, красный, синий,
Зеленый, желтый цвет.

И чуть дальше:

Огнями на просторе
Играет легкий шар.
То в нем синеет море,
То в нем горит пожар.

К восторгам Маршака, пожалуй, каждый из нас, наблюдавший мыльные пузыри, может добавить и собственные восторги, разве что высказанные не стихами, а прозой.

В этом очерке нас будет интересовать причина появления расцветки мыльных пузырей. Именно это имеется в виду, когда говорят «оптика мыльного пузыря».

Вначале очень коротко об истории проблемы. Физика XVIII века передала XIX веку по наследству противоречивые представления о природе света. К Ньютону восходили представления о «корпускулярном» свете – потоке гипотетических частиц – корпускул. Ньютон считал, что, попадая на сетчатку глаза, частицы возбуждают ощущение света: маленькие корпускулы создают впечатление фиолетового цвета, а корпускулы побольше – красного. Эти представления, объясняя некоторые закономерности распространения света, оставляли без всякого объяснения множество явлений, среди которых оказалась и интерференция света.

К Гримальди, Гуку и Гюйгенсу восходили представления о волновой природе света. Итальянский физик Франческо Гримальди, младший современник Ньютона, сравнивал распространение света с распространением волн на воде.

Мы вспомнили о рубеже между XVIII и XIX веками именно потому, что в это время жил один из величайших физиков Томас Юнг, который своими исследованиями обосновал волновые представления о свете, объяснив, в частности, всевозможные проявления интерференции. Да и сам термин «интерференция» ввел в науку впервые именно Томас Юнг.

Это был человек беспримерно многогранного дарования и необозримого круга творческих интересов. Вот перечень областей деятельности, в которых он добился выдающихся достижений: ботаника, музыка, живопись, металлургия, языкознание, филология, египтология, физика, математика, механика и даже цирковая гимнастика. Но, пожалуй, наиболее значимые его достижения связаны с развитием представлений о волновой природе света и, в частности, о природе явления интерференции, о цветах тонких пленок. Французский физик Доменик Араго написал о Томасе Юнге: «Ценнейшее открытие доктора Юнга, которому суждено навеки обессмертить его имя, было ему внушено предметом, казалось бы, весьма ничтожным: теми самыми яркими и легкими пузырями мыльной пены, которые, едва вырвавшись из трубочки школьника, становятся игрушкой самых незаметных движений воздуха».

Отдав дань стихам, восторгам и истории, обратимся к физике, поговорим об «оптике мыльного пузыря». Вначале договоримся о том, что́ из оптики мы будем считать известным читателю. Читателю известно, что распространение света – процесс волновой и что распространяющаяся монохроматическая волна имеет определенную длину волны λ_0. Известно также, что световой луч отражается от поверхности раздела двух сред, а проходя сквозь эту границу, он преломляется. А еще известно, что так называемый «белый цвет» является смесью разноцветных монохроматических лучей – от красного до фиолетового. Длина волны красного луча больше, чем фиолетового луча. И, наконец, известно, что при переходе из пустоты в вещество пленки длина волны λ_0 изменяется, становится равной $\lambda_в$. Величина $n = \lambda_0/\lambda_в$ называется показателем преломления. В школьном курсе физики обо всем этом рассказывают, и мы просто напомнили известное.

Теперь направим под некоторым углом i на поверхность тонкой пленки толщиной h монохроматический свет, длина волны которого λ_0. Произойдет вот что: луч света частично отразится от поверхности пленки, а частично, преломившись под углом r, войдет в ее объем. На нижней поверхности пленки произойдет то же самое: преломление и отражение. Отраженный луч вернется к верхней поверхности, отразится и преломится, и какая-то доля его выйдет из пленки, где встретится с одним из лучей падающего первичного пучка. Произойдет это в точке C. Точка эта, в основном, нас и интересует.

В точке C встречаются два луча, рожденные одним источником, но прошедшие разные пути. О таких лучах говорят «когерентные». Их отличительная особенность состоит в том, что разность фаз их колебаний остается неизменной. Характер взаимодействия этих лучей в точке C определяется разностью путей, пройденных ими до прихода в эту точку. Эта разность путей называется оптическая разность хода Δ.

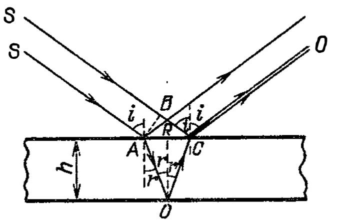


Схема к объяснению интерференции света в тонкой пленке

Из очень несложного расчета, выполненного с помощью приведенного здесь рисунка и определения $n = \sin i / \sin r$ следует, что

$$\Delta = 2hn \cos r.$$

Мы подошли к самому существенному достижению Томаса Юнга. Он обратил внимание на то, что при выполнении условия $\Delta = k\lambda_0/2$ (k – целое число) могут иметь место два существенно различных эффекта: если k – четное число, волны усилят друг друга, а если нечетное – ослабят, точнее говоря, погасят друг друга.

Поражает мощь основной идеи механизма интерференции по Юнгу, которая очень естественно объясняет удивительный экспериментальный факт: свет, слагаясь со светом, порождает тьму! Иному читателю может показаться, что в полученном результате что-то неблагополучно, так как появление тьмы означает исчезновение энергии, а уж этого заведомо не должно происходить. На самом деле, не означает, так как энергия в процессе интерференции не исчезает, она перераспределяется, накапливаясь там, где два луча усиливают друг друга.

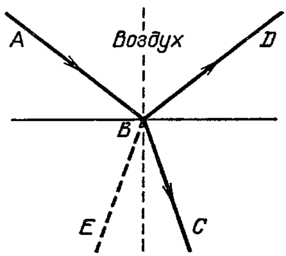
Основываясь на формуле, определяющей Δ, мы можем очень многое понять в том, что назвали «оптикой мыльного пузыря». В формуле при данном значении n воедино связаны длина волны света λ_0, толщина пленки h и угол r, а следовательно, и угол падения пучка на пленку i. Предположим, что на поверхность пузыря, образованного пленкой постоянной толщины, падает пучок белого света и различные участки поверхности пузыря пучок встречает под различными углами. Это означает, что в условия, при которых отраженный луч усиливается, будут попадать лучи с различной длиной волны и различные участки пузыря будут отсвечивать различными цветами радуги: «лиловый, красный, синий, зеленый, желтый цвет». Это может произойти и по другой причине: различные участки пленки пузыря со временем меняют свою толщину (теперь уже меняется h), и именно поэтому «то в нем синеет море, то в нем горит пожар». Если приглядеться к мыльному пузырю, можно отчетливо увидеть потоки жидкости, меняющие его окраску.

Следуя за несметным количеством предшественников, и мы можем поставить опыт по интерференции в мыльных пленках в условиях близких к тем, в которых находятся разные участки пленки мыльного пузыря. Дело в том, что в мыльном пузыре всегда есть участки, в которых под влиянием силы тяжести жидкость движется вниз и, следовательно, толщина пленки меняется, а с ней меняется и ее окраска.

Опыт вот какой. Плоская пленка на каркасе располагается вертикально. Со временем она приобретает форму клина: вверху тоньше, внизу толще. Пленка приобретает полосчатую, разноцветную, меняющуюся со временем окраску. Окраска как бы плывет вместе с потоками жидкости.

Чтобы закончить рассказ об оптике мыльного пузыря, обязательно надо сказать о черных полосах и пятнах в окраске пузыря. Они особенно отчетливо видны, когда пузырю осталось жить всего несколько мгновений.

Попытаемся понять физическую причину появления черных пятен, вспомнив о том, что, обсуждая оптическую разность хода лучей в тонкой пленке Δ, мы умолчали об одной детали во взаимодействии света с пленкой. Эта деталь не очень существенна, когда пленка толста ($h \geqslant \lambda_0$), и не допускает пренебрежения собой, когда пленка тонка ($h \ll \lambda_0$). Дело в том, что, как оказывается, отражение луча от границ воздух – пленка и пленка – воздух происходит так, что оптическая разность хода при этом скачком изменяется на половину длины волны. В соответствующем разделе теоретической оптики это обстоятельство доказывается математически строго. Известны, однако, совсем простые рассуждения английского физика Джорджа Стокса, отчетливо объясняющие это явление. Приведем его рассуждения. Если направление



Схема, поясняющая появление «черных пятен» в расцветке тонкой пленки распространения луча, отраженного от границы воздух – пленка (BD), и луча, преломленного в ней (BC), обратить, они должны образовать луч (BA), равный по интенсивности и направленный противоположно первичному лучу (AB). Это утверждение справедливо, оно попросту отражает закон сохранения энергии. Обращенные лучи CB и DB, вообще говоря, могли бы образовать еще луч (BE). Он, однако, отсутствует, это – экспериментальный факт. Следовательно, в его создание лучи CB и DB вносят вклады в виде лучей, которые равны по интенсивности, но смещены по отношению друг к другу на половину длины волны и поэтому гасят друг друга. Если к сказанному добавить, что один из этих лучей испытывал отражение от границы воздух – пленка, а другой от границы пленка – воздух, то станет ясно, что дополнительный скачок $\Delta = \lambda_0/2$ при отражении от границ между воздухом и пленкой происходит.

Возвратимся теперь к черным пятнам и полосам. Если толщина пленки настолько мала, что оптическая разность хода, вычисленная без учета потери полуволны при отражении от границы воздух – пленка, оказывается малой по сравнению с длиной волны, то интерференция будет определяться только тем, что лучи смещены на половину длины волны, т. е. они будут гасить друг друга. А это и означает, что возникает черная окраска пленки.

Всю логику рассказа о черных пятнах на мыльном пузыре можно бы обратить и утверждать следующее. Черная окраска очень тонких пленок – это факт! А следовательно, при отражении двух лучей от границ воздух – пленка и пленка – воздух между ними должна возникать дополнительная оптическая разность хода, равная половине длины волны. Это путь не от логики к эксперименту, а от эксперимента к логике. Оба пути законны и дополняют друг друга.

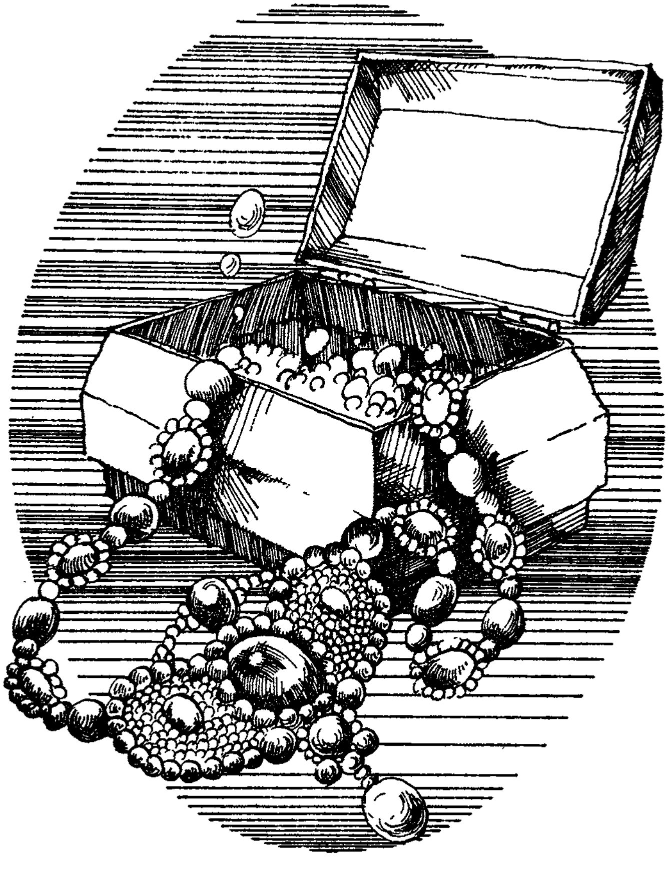
Мы познакомились с идеями, которые в наши дни выглядят почти само собой разумеющимися, а в начале XIX века, во времена Томаса Юнга, были поразительным откровением. Ведь, подумать только: свет, слагаясь со светом, порождает тьму!

ГЛАВА 2

КРИСТАЛЛ ИЗ ПУЗЫРЕЙ

Кристаллу не пристало
Терять черты кристалла.

Сергей Смирнов. «Кристалл»



В 1942 г. выдающийся английский физик, Нобелевский лауреат Лоуренс Брэгг был уже совсем немолодым человеком и занимал одну из самых почетных научных должностей Англии – он был директором знаменитой Кавендишской лаборатории, сменив на этом посту Резерфорда. И все же в нем были живы и юношеская непредвзятость во взглядах на явления природы, и потребность фантазировать, и лихость в поисках аналогий и сравнений – все то, без чего нет истинного ученого. А иначе как бы ему пришла в голову удивительная мысль искусственно создать кристалл, состоящий не из атомов и не из молекул, а из огромного количества одинаковых мыльных пузырьков! Именно так: кристалл из мыльных пузырьков! Прежде чем совместно со своими сотрудниками взяться за создание такого кристалла, он должен был мысленным взором увидеть это необычное создание, не оробеть перед высотой, на которую взлетела его фантазия. А может быть, все по-иному: фантазия – потом, а вначале было случайное наблюдение над скоплением пузырьков на поверхности дождевой лужи. И в этом случае путь от наблюдения до пузырькового кристалла прошел лихой фантазер, презирающий и робость, и зарекомендовавшие себя стандартные приемы мышления. В тот день, когда немолодой профессор Брэгг придумал пузырьковую модель кристалла, он был юным, сильным и удачливым.

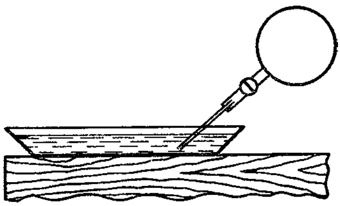
Пузырьковый кристалл Брэгга в книге о пузырях нам явно «по пути». Познакомимся с ним, посвятим ему эту главу.

Скопление пузырей на воде

Если вам никогда не случалось наблюдать за пузырями, которые во время дождя возникают на поверхности реки или лужицы,– послушайте добрый совет, понаблюдайте за ними. Не за одним, а за множеством пузырей и пузырьков.

О пузырях на воде мы уже кое-что знаем: знаем о том, как они возникают, что происходит, когда лопаются, какую имеют форму. А в этом очерке – часть правды о тех пузырях, которые выживают. Некоторые из них длительное время остаются неподвижными, а некоторые движутся, гонимые кругами – волнами, которые возбуждаются, и каплями, падающими по соседству, и соседними лопающимися пузырьками. А чаще всего, все выжившие пузыри движутся, гонимые ветром. В их движении есть одна важная особенность: случайно оказавшиеся в близком соседстве, они притягиваются друг к другу. А это означает, что на поверхности воды должны образоваться скопления притянувшихся друг к другу пузырьков. Иногда – это большой пузырь, обрамленный множеством мелких, иногда – это совокупность многих пузырьков, близких по размеру. Но всегда это скопление устойчиво: собравшись воедино пузырьки не желают разбегаться врозь. В совокупности они значительно более устойчивы и жизнеспособны, чем каждый из них порознь: скопление живет дольше, чем одиночный пузырек. А вот если один из пузырьков в скоплении лопнет,– его судьба может постигнуть если не всех, то многих соседей, соприкасавшихся с ним.

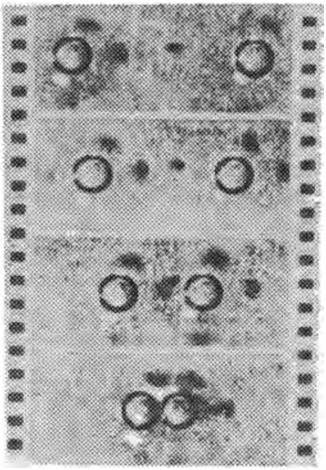
Самое интересное из того, что мы увидели,– это взаимное притяжение разобщенных пузырьков. О нем-то и поговорим подробнее. Подчеркнем: взаимное притяжение разобщенных, а не соприкоснувшихся пузырьков. О них разговор был ранее. Чтобы понять физику этого явления, промоделируем его в специальном опыте.



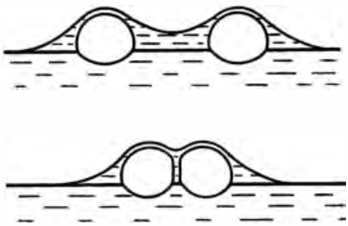
Устройство для получения множества одинаковых мыльных пузырьков

Вначале, для проведения опыта, раздобудем необходимое «оборудование»: тарелку, медицинскую иглу от шприца, резиновую волейбольную камеру и зажим с регулируемым поджатием, с помощью которого можно было бы с различной силой сжимать трубку – отросток резиновой камеры. Теперь подготовим опыт. Тарелку почти доверху заполним мыльной водой и добавим в нее несколько капель глицерина. Оказывается, что пузырьки, которые мы будем выдувать на поверхности мыльной воды, благодаря этим каплям обретают большую устойчивость. Надуем резиновую камеру, зажмем ее отросток и вставим в него иглу от шприца (разумеется, тупым концом). Опустим свободный конец иглы неглубоко под воду и немного ослабим зажим. Из иглы одна за другой начнут выходить одинаковые порции воздуха, которые будут превращаться в одинаковые мыльные пузырьки. Много пузырьков нам понадобится позже, а для этого первого опыта надо ухитриться создать всего два пузырька на некотором расстоянии друг от друга. Если сразу не получится — получится после пятой попытки! Удобно этот опыт проводить с пузырьками, диаметр которых 2–3 мм.

Итак, пузырьки созданы, теперь можно за ними наблюдать. Сначала очень медленно, а затем (без нашего вмешательства!) ускоряясь, пузырьки будут двигаться навстречу друг другу. Столкнувшись, они соприкоснутся не в точке, а как бы вдавятся один в другой. Это видно очень отчетливо.



Пузырьки на поверхности жидкости притягиваются друг к другу

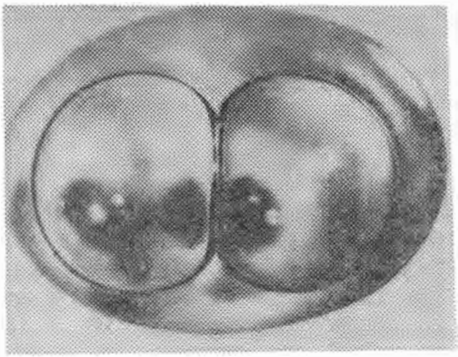


Так изменяется профиль поверхности жидкости при сближении двух пузырьков

Сила, сжимающая два соприкоснувшихся мыльных пузыря на воде, — того же происхождения, что и сила, прижимающая два свободных мыльных пузыря. Эту силу мы ранее обсуждали. В случае пузырей на воде лишь немного иная геометрия контактной зоны.

Попытаемся понять происхождение силы, которая заставляет пузырьки, находящиеся на некотором расстоянии, самопроизвольно сближаться. Несколько удобнее сделать это, рассматривая не два мыльных пузырька, а две спички, параллельно лежащие на поверхности воды. И пузырьки, и спички смачиваются водой, на которой они плавают, поэтому характер взаимодействия для тех и других один и тот же. Удобство такой замены в том, что два плавающих пузырька, находясь один от другого на расстоянии, при котором уже обнаруживается их взаимодействие, образуют вместе с жидкостью сложную поверхность, а спички — гораздо более простую. Ее и представить себе проще, и обсудить легче.

Сила, сближающая две плавающие спички, возникает вот в связи с чем. Вода смачивает спички, поэтому ее поверхность возле спички искривляется, становится вогнутой. Искривление поверхности приводит к тому, что в области между спичками действует давление, которое



Пузырькам на воде недостаточно лишь соприкоснуться в точке. Они как бы вдавливаются друг в друга, подобно тому, как это происходит и со свободными пузырями

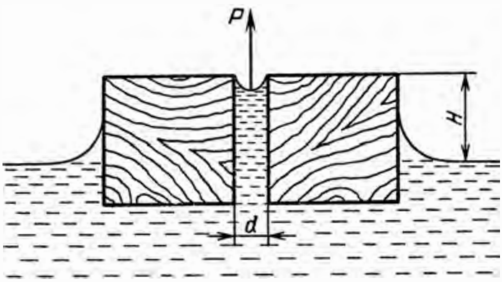


Схема к расчету притяжения двух спичек, плавающих на поверхности воды

меньше атмосферного на величину лапласовского давления. Будем считать, что расстояние между спичками мало. Тогда изогнутая поверхность жидкости имеет форму полуцилиндра и $P_Л = 2\alpha/d \approx \alpha/R$, где d – расстояние между спичками, $R = d/2$ – радиус кривизны поверхности жидкости. Следовательно, и давление жидкости на спички в области между ними по абсолютной величине меньше давления, действующего на спички за ними, на величину $\Delta P = P_Л$. Так появляется сила, сближающая спички. При длине спичек l эта сила равна

$$F = 2\Delta PS \approx 4\alpha Hl/d,$$

где $S \approx Hl$ – поверхность, обусловленная разностью уровней воды между спичками и за ними; H – высота поднятия жидкости в области между спичками. Так как

$$2\alpha/d = \rho g H,$$

то

$$F = 8\alpha^2 l/\rho g d^2 \sim 1/d^2.$$

Приведенная оценка силы F приближенна, так как мы молчаливо предполагали, что вода идеально смачивает поверхность спичек, т. е. краевой угол смачивания θ равен нулю. Полагалось бы рассмотреть и случай, когда $\theta \neq 0$. Это изменило бы значение F, не меняя характер зависимости F от d. Впрочем, если бы между спичками оказалась не смачивающая их вода, а какая-нибудь иная несмачивающая жидкость, они отталкивались бы. Этот случай, однако, лежит в стороне от наших интересов.

Предскажем любопытное явление: так как сила $F \sim 1/d^2$, то спички, находящиеся в вязкой среде, будут сближаться со скоростью, увеличивающейся с уменьшением расстояния между ними. И не только спички. Пузырьки тоже сближаются, ускоряясь. Мы это отчетливо наблюдали и процесс сближения засняли на кинопленку (см. рисунок на с. 74).

Центры соприкоснувшихся пузырьков устанавливаются на некотором расстоянии друг от друга. Если попытаться их насильственно сблизить – обнаружится сила отталкивания. Об этом мы ранее говорили, обсуждая взаимодействие двух соприкоснувшихся мыльных пузырей.

Итак, находящиеся по соседству пузырьки, как оказалось, обнаруживают основную особенность взаимодействия между атомами в кристалле: находясь на некотором расстоянии друг от друга, они притягиваются, а оказавшись очень близко друг к другу, они отталкиваются.

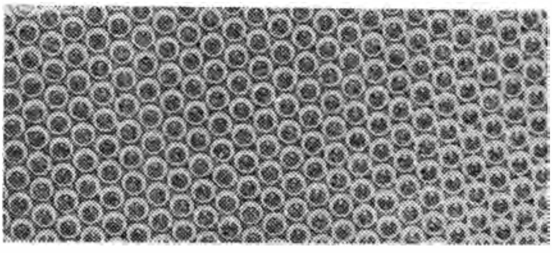
Брэгг, видимо, рассуждал так. Мыльные пузырьки, имитирующие взаимодействие между атомами, могут быть использованы для построения модели реального кристалла. Одну особенность реального кристалла, состоящего из реальных атомов, пузырьковый кристалл будет обнаруживать: подобно атомам, пузырьки взаимодействуют.

Аналогия между взаимодействием атомов в кристалле и между мыльными пузырьками простирается существенно дальше внешнего подобия. Оказывается (!), что зависимость энергии взаимодействия между пузырьками на поверхности мыльного раствора от расстояния между ними $W(x)$ такая же, как зависимость энергии взаимодействия от расстояния между соседними атомами в реальном кристалле: экспериментально, например, показано, что ход зависимости $W(x)$ для пузырьков, радиус которых $R \approx 10^{-3}$ м, подобен такому же ходу зависимости для атомов в кристалле меди.

Для создания модели кристалла на поверхности мыльного раствора следует поселить не один, не два, а множество одинаковых пузырьков. Если радиус пузырька $R = 5 \cdot 10^{-4}$ м, то на поверхности мыльного раствора в обыкновенной тарелке, радиус которой $r = 10^{-1}$ м, можно поселить

$$N = (r/R)^2 \approx 4 \cdot 10^4 \text{ пузырьков!}$$

Такой плот и представляет собой двумерную модель кристалла.



Идеальный пузырьковый кристалл

На этом я и закончу рассказ о притяжении пузырей на воде, проведя читателя от дворовой лужи, на которую падают дождевые капли, до лабораторной установки с кинокамерой. Весь этот маршрут «от» и «до» нам был необходим, чтобы понять и увидеть воплощенной брэгговскую идею пузырькового кристалла — двумерного, плотноупакованного плота из одинаковых пузырей.

Важная заслуга кристалла из пузырей перед наукой

Об этой, очень конкретной, заслуге можно рассказать коротко, десятком-другим фраз.

Одной из важных характеристик обычных, добропорядочных кристаллов, состоящих не из пузырьков, а из атомов или молекул, является величина напряжения, которое необходимо приложить, чтобы сдвинуть одну часть кристалла относительно другой. Она называется «прочность на сдвиг» σ_c. Выдающийся советский теоретик Я. И. Френкель, имея в виду кристалл с идеальной структурой, т. е. абсолютно свободный от дефектов, эту величину вычислил и показал, что

$$\sigma_c \approx G/2\pi,$$

где G — модуль сдвига кристалла. Эта величина характеризует способность кристалла сопротивляться напряжениям, вызывающим деформации сдвига: чем больше G, тем труднее сдвинуть одну часть кристалла относительно другой. Расчет теоретика не вызывал и не вызывает сомнений, найденная им формула выглядит вполне убедительно: прочность на сдвиг пропорциональна модулю сдвига. В соответствии со здравым смыслом так и должно быть! А вот экспериментально проверить эту формулу не представляется возможным почти принципиально, так как предположение теоретика об идеальности кристалла означает, что и опыты надо ставить с идеальными кристаллами, а таких практически нет. А если бы и нашелся такой кристалл, в нем возникли бы дефекты в процессе испытания на сдвиг и опыт, призванный проверить теорию, потерял бы смысл.

Дело в том, что дефект в кристалле, т. е. область, где идеально правильный порядок в расположении атомов нарушен, может очень существенно облегчить его деформирование, в том числе и сдвиговое.

Вот здесь и пришел на помощь кристалл из мыльных пузырей. Он очевидно идеален. Очевидно в том смысле, что его идеальность и сохранность его идеальности в опыте видны очами. Такой кристалл вполне соответствует предположениям теоретика, а для экспериментатора просто находка. Не стану подробно описывать, как были поставлены опыты. Они были совсем просты: двумерный идеальный плот из пузырей и линейка, движущаяся параллельно поверхности плота так, что она стремится сдвинуть одну его часть относительно другой. Основная сложность состояла в том, что для измерения малых напряжений нужно было создать очень чувствительный динамометр. Создали! И убедились, что найденная σ_c близка к расчетной. Безусловно,— это большая заслуга перед наукой об истинных кристаллах модельного кристалла, изготовленного из пузырей.

Я слышал возражения, мол, невелика «важная заслуга», если реально бездефектные кристаллы не существуют. Они кажутся несостоятельными и вот почему. Современная наука о кристаллах — это в значительной мере наука о дефектах в них. Бездефектный кристалл — это фон, на котором обнаруживаются свойства дефектов, и характеристики этого фона совсем небезразличны для науки о реальном кристалле с дефектами.

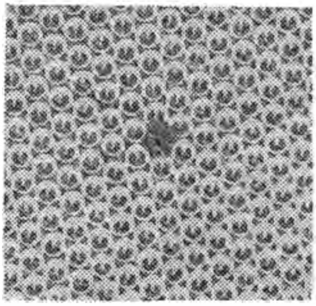
Модель в действии

Предыдущий очерк был посящен «важной заслуге». Этот — иным заслугам. Быть может, не столь важным, но заслугам, о которых следовало бы рассказать даже и в том случае, если бы с помощью пузырькового кристалла ничего не было ни открыто, ни подтверждено, ни доказано, а просто впечатляюще проиллюстрировано.

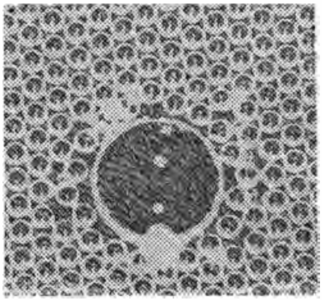
Хорошо бы всем читателям книги показать кинофильм, в котором заснята пузырьковая модель кристалла в действии. Они увидели бы и идеальный кристалл, тот, за которым числится «важная заслуга», и реальный кристалл с различными дефектами — покоящимися и движущимися — и множество простых и сложных процессов, которые происходят в реальном кристалле. К сожалению, такой возможности нет, и мы удовлетворимся словами и монтажом кадров этого фильма.

Вначале — о некоторых особенностях строения реального кристалла, а затем — о процессах, которые в нем происходят.

Один из самых распространенных дефектов в кристаллах — это пустая позиция в узле решетки, не занятая атомом. Физики называют его вакансией. В пузырьковой модели кристалла вакансия — это один лопнувший пузырек. В полном согласии и со здравым смыслом, и с результатами опытов с реальными кристаллами пузырьковая модель свидетельствует о том, что объем одной вакансии немного меньше объема, приходящегося на занятую позицию. Действительно, после того, как пузырек лопнул, его бывшие соседи немного переместятся в образовавшуюся пустоту и уменьшат ее. Невооруженным глазом это увидеть почти невозможно, но, если спроектировать кино- или фотопленку на экран и тщательно промерить расстояния между пузырьками, можно убедиться, что по сравнению с занятой позицией вакансия немного сжата. Для физиков это свидетельство пузырьковой модели не просто качественная иллюстрация, оно имеет и количественную ценность.



Модель «вакансии» — пустой позиции в структуре кристаллической решетки



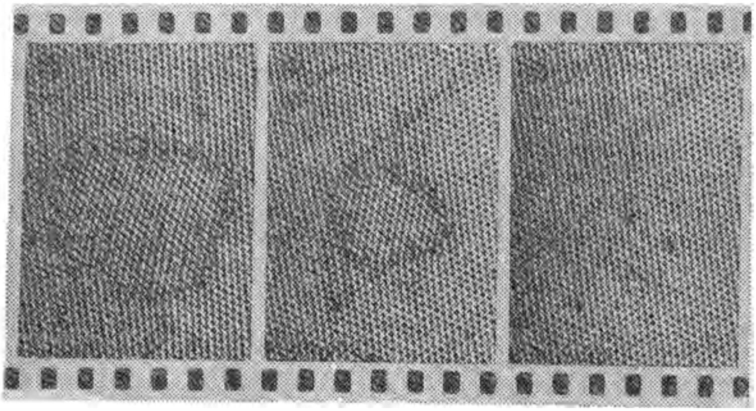
Посторонняя примесь, внедренная в пузырьковый кристалл

Очень часто в кристалле вследствие его предыстории оказывается постороннее включение, деформирующее кристалл. При решении многих задач физики кристаллов очень важно знать, как при этом смещаются атомы, окружающие включение. Оказывается, присутствие инородного включения чувствуют не только непосредственные соседи, но и атомы, расположенные от включения на значительном расстоянии. Пузырьковая модель это отчетливо иллюстрирует.

Теперь — о процессах, которые в пузырьковом кристалле, в отличие от обычного, можно прямо увидеть. Расскажу о нескольких таких процессах.

В поликристаллах может происходить процесс укрупнения одних участков (зерен) за счет других, в результате чего средний размер зерна увеличивается. Называется этот процесс рекристаллизацией, и происходит он по причине понятной: чем больше размер зерен, тем меньше суммарная поверхность границ, а значит, меньше и энергия, которая с границами связана. Энергия поликристалла при рекристаллизации уменьшается, следовательно, этот процесс может происходить самопроизвольно, поскольку он приводит к уменьшению запаса энергии кристалла.

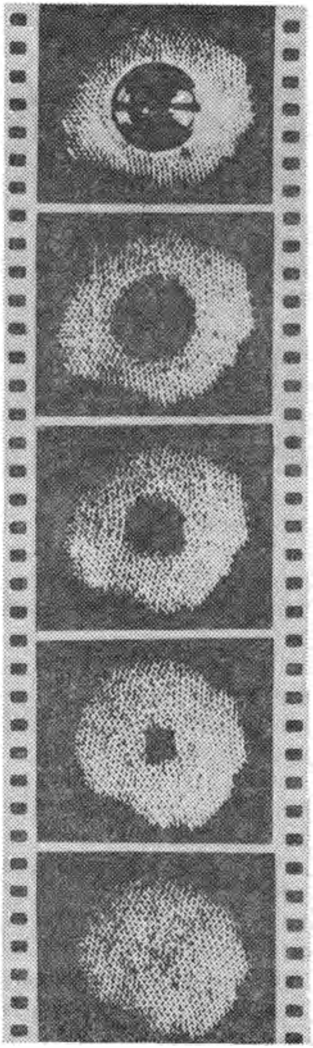
На рисунке приведена кинограмма, иллюстрирующая последовательные этапы «поедания» большим зерном расположенного в нем маленького зерна.



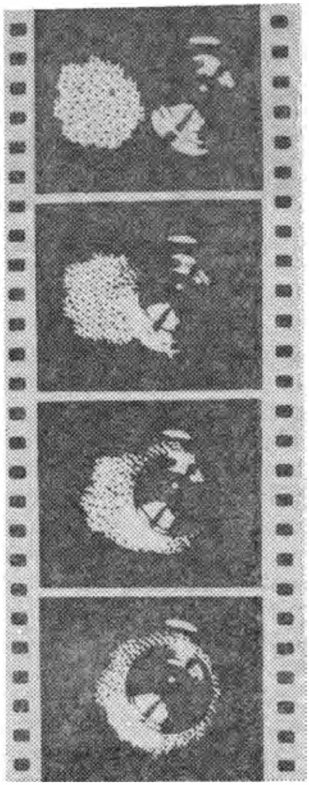
Граница между двумерными кристаллами движется, укорачиваясь, для того, чтобы в конце концов исчезнуть

Оказывается (это предсказали теоретики и тщательно изучили экспериментаторы в опытах с реальными кристаллами), движущаяся граница между зернами «заглатывает» те вакансии, которые ей встречаются по пути. При этом граница не изменяет своего строения. Пузырьковая модель это явление отлично иллюстрирует. Она иллюстрирует и обратный процесс – испускание вакансий движущейся границей.

Многие годы физиков интересует вот какая проблема: как из кристалла удаляется пустота, которая в нем существует в виде пòры. Эта проблема – одна из основных проблем той главы физики кристаллических тел, которая именуется «Физика спекания». Ученые, изучающие процесс спекания, поняли, как залечивается пòра. Тем более важно поглядеть, как это происходит в натуре, сверить созданные представления о процессе с реальностью. Здесь надо оговориться: «с реальностью» – это значит с тем, что происходит в реальных кристаллах. Это, разумеется, делали. И все же модельный опыт может явиться источником новых наблюдений, а затем и идей. При залечивании по́ры происходит то, что изображено на приводимой многокадровой кинограмме. Всмотритесь в нее внимательно – она того стоит. Во-первых, обнаруживается «лапласовское» давление, вынуждающее вещество



Процесс исчезновения (залечивания) изолированной по́ры в пузырьковом кристалле



Маленькие пузырьки обволакивают крупный, «адсорбируясь» на его контуре двумерного пузырькового кристалла течь в объем пóры. А иначе почему бы пòра самопроизвольно залечивалась? Во-вторых, отчетливо видно, что в объем пóры течет пузырьковое вещество, расположенное вдали от нее. Это означает, что пузырьковому веществу можно приписать не только поверхностную энергию, но и вязкость. А это уж совсем интересно, так как моделируется не только характеристика строения вещества, но и характеристика его движения.

Несколько фраз еще об одном использовании пузырьковой модели. Есть такое явление – адсорбция, мы о нем знаем. Адсорбцию можно отлично проиллюстрировать с помощью пузырьковой модели кристалла. Делается это вот как.

Поверхность основного кристалла, на которой должна наблюдаться адсорбция, моделируется периметром большого ($R \approx 2$ см) пузыря, плавающего на поверхности мыльного раствора. Вещество, которому надлежит адсорбироваться, в виде большого числа маленьких ($R \approx 0{,}1$ см) пузырьков расположено по соседству. Если маленьким пузырькам дать возможность соприкоснуться с большим пузырем, они немедленно обегут вокруг его периметра, создав своеобразный адсорбционный слой. Происходит все, как при адсорбции на поверхности реального кристалла: маленькие пузырьки, поселившиеся в непосредственной близости большого пузыря вдоль его периметра, уменьшают объем воды, поднятой пленкой большого пузыря, а следовательно, и потенциальную энергию воды вдоль периметра. В двумерной модели трехмерного тела энергия, связанная с линией периметра, – аналог поверхностной энергии.

Модели в физике, а особенно в физике кристаллов, применяются очень широко. Одна из наиболее успешно применяемых – пузырьковая модель.

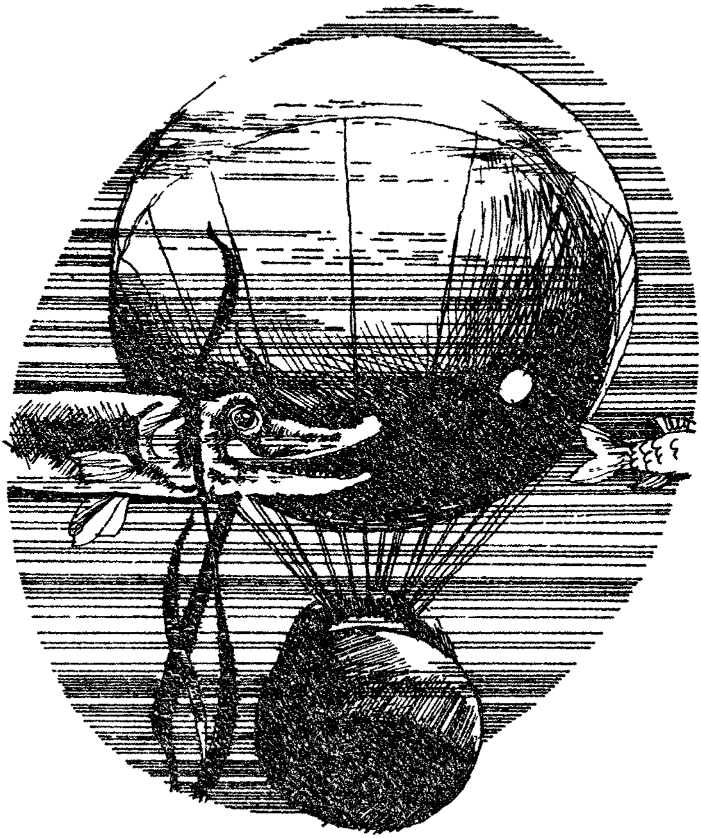
Здесь, пожалуй, уместен десяток фраз о ценности и значимости моделирования в физических исследованиях. Можно привести великое множество примеров того, как правильно придуманная или, скажем так, построенная модель способствует пониманию ранее неизвестного явления, освобождая его от второстепенных, несущественных характеристик. Пузырьковая модель кристалла – великолепный пример разумного, не вульгарного моделирования. Вдумайтесь, сколь многим она отличается от реального кристалла: она двумерна, а кристалл трехмерен, пузырьки практически не участвуют в тепловом движении, а атомы кристалла участвуют, все зависящие от температуры процессы в ней заморожены, а в реальном кристалле они происходят с интенсивностью, которая растет с температурой. Как видите, модель далека от натуры по причине очень простой: она модель, а не натура. И все же следует признать весьма удачной пузырьковую модель, так как одну из важнейших особенностей кристалла – взаимодействие между упорядоченно расположенными атомами – она моделирует. Будем ей благодарны за эту ее сильную сторону.

ГЛАВА 3

ПУЗЫРИ В ЖИДКОСТИ

Среду свою ругает он всегда:
Сплошная, мол, безликая среда.
А нам с тобой со стороны видней,
Что он – пустое место даже в ней.

Вадим Левин. «Пузырь в воде»



Газовый пузырек в жидкости! Ситуация общеизвестная и как будто бы совершенно понятная: пузырек всплывет, у поверхности вскроется, содержащийся в нем газ уйдет в паровую фазу вблизи поверхности жидкости. Совершенно понятно, почему это происходит: поднятие пузырька сопровождается опусканием центра масс жидкости с пузырьком. Заметим, что после вскрытия газового пузырька уровень жидкости понизится на некоторую величину, а это всегда выгодно, как бы мала она ни была.

Нарочито упрощенный рассказ о судьбе пузырька в жидкости, разумеется, не исчерпывает всей многогранности тех процессов, которые происходят или могут происходить с ним. Их множество, этих процессов и явлений, а зависят они и от размера пузырька, и от свойств жидкости, и от размера и формы сосуда, в котором жидкость находится, и от сорта газа, которым заполнен пузырек, и от многого иного. Из этого «многого иного» в главе рассказано кое о чем.

Пузырек всплывает в жидкости

Читая этот очерк, полезно вспомнить очерк о падении мыльного пузыря: в нем — о пузырьке, движущемся в воздухе, а здесь — о газовом пузырьке, движущемся в жидкости.

Полагая, что всплывающий пузырек сохраняет сферическую форму, запишем выталкивающую его архимедову силу $F_{\uparrow}$, которая обусловлена различием плотностей жидкости ρ и газа в пузырьке $\rho_г$. Она определяется известной формулой:

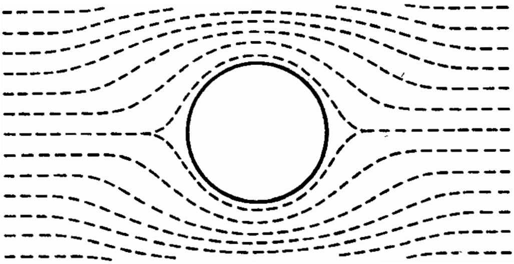
$$F_{\uparrow} = (4/3)\pi R^3 (\rho - \rho_г) g \approx (4/3)\pi R^3 \rho g.$$

В записанной формуле учтено, что $\rho_г \ll \rho$.

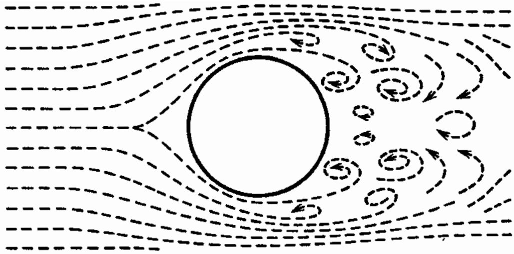
Обсудим, как под действием архимедовой силы всплывает пузырек, который, двигаясь медленно, сохраняет сферическую форму.

Словом «всплывает» мы прикрыли сложный процесс и обратили внимание лишь на его зримый результат. Вокруг пузырька возникают потоки, которые перемещают жидкость от лобовой поверхности пузырька к его тыльной поверхности. Чем дальше от пузырька, тем с меньшей скоростью перетекает жидкость, тем менее она «осведомлена» о том, что в ней движется пузырек. В действительности, разумеется, течет жидкость, а видим мы зримый результат этого течения — всплывание пузырька! Именно поэтому скорость его всплывания должна зависеть и от того, как движется жидкость, и от ее физических свойств.

Мы предположили, что наш пузырек движется медленно. Договоримся так: «медленным» будем называть такое движение пузырька, при котором перетекание воды от его лобовой к тыльной поверхности не сопровождается появлением завихрений, вода течет спокойно, как бы



а



б

Схемы ламинарного (а) и турбулентного (б) обтекания жидкостью движущегося в ней пузыря

послойно и слои не перемешиваются между собой. Физики говорят «ламинарно». Путь, по которому движутся слои жидкости, можно изобразить линиями. При ламинарном течении они не изламываются, взаимно не пересекаются и не пересекают сами себя. В потоке, как уже упоминалось, не появляются вихри. Соприкасающиеся слои жидкости получают информацию друг о друге вследствие их взаимного трения. При таком обтекании пузырька жидкостью установившаяся скорость его ламинарного всплывания $v_{\uparrow л}$, очевидно, должна зависеть от вязкости жидкости η. Разумно, чтобы величина $v_{\uparrow л}$ зависела от радиуса пузырька R и уж совсем определенно она должна зависеть от силы F, действующей на пузырек. Явно должна существовать связь между величинами $v_{\uparrow л}$, η, R и F. Физики определяют эту связь теоретически строго, пользуясь сложными методами своей науки. Мы строгостью пожертвуем. Сделаем это тем более без сожаления, что она нам и не доступна. Удовлетворимся общими физическими соображениями. Они дадут основания написать формулу, которая от точной отличается лишь численным безразмерным множителем. Это будет безусловным успехом, так как будет означать, что физику явления мы понимаем правильно.

Вот они, эти так называемые общие физические соображения, которые мы подкрепим и соображениями о размерностях.

Естественно предположить, что скорость $v_{\uparrow л}$ пропорциональна выталкивающей силе F, и тем меньше, чем больше радиус пузырька R и вязкость воды η. Запишем сказанное в буквенных обозначениях в виде формулы:

$$v_{\uparrow л} \backsim F/\eta R.$$

Всегда, когда пользуются так называемыми «общими соображениями», есть опасность, что какая-нибудь из характеристик вещества или процесса окажется этими соображениями не учтенной. В нашем случае возникает подозрение: а не зависит ли $v_{\uparrow л}$ от плотности жидкости, достаточно ли из свойств жидкости учитывать только ее вязкость η. Может возникнуть мысль о том, что «общим соображениям» не противоречила бы, например, такая зависимость: $v_{\uparrow л} \backsim 1/\rho$. Так вот, в интересующем нас случае такой зависимости v от ρ не должно быть. Дело в том, что мы обсуждаем случай очень медленного всплывания пузырька в вязкой жидкости. В этом случае естественно предполагать (это мы и делаем), что энергия, передаваемая всплывающим пузырьком обтекающей его жидкости, главным образом расходуется на преодоление вязкого трения, а не на придание жидкости кинетической энергии, которая должна зависеть от массы жидкости, а значит, и от ее плотности. Зависимость v от ρ типа $v \sim \rho$ появится, если $F = F_{\uparrow}$ – выталкивающая сила, которая пропорциональна ρ, но это дань частному случаю всплывания (см. далее).

Вернемся, однако, к нашей формуле. Итак: оказывается, что комбинация физических величин, стоящих в нашей формуле справа, является единственной, имеющей размерность скорости. Именно, к счастью, оказывается. Попробуйте поискать другую комбинацию этих величин с той же размерностью. Возводите их в различные степени, извлекайте из них любые корни – пустое дело! Размерность скорости не получите! И не потому, что почему-либо не сумеете это сделать, а потому, что другой комбинации не существует.

Действительно, перепишем нашу формулу в виде $v_{\uparrow} \sim F_{\uparrow}^{x} \eta^{y} R^{z}$, учтем, что $[v_{\uparrow}] = м \cdot с^{-1}$, $[F_{\uparrow}] = кг \cdot м \cdot с^{-2}$, $[\eta] = кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-1}$, $[R] = м$, и потребуем, чтобы размерности левой и правой частей нашей формулы совпадали. Мы убедимся, что $x = 1$, $y = -1$, $z = -1$, т. е. то, что и записано в нашей формуле.

Здесь, впервые воспользовавшись соображениями о размерностях для нахождения связи между размерными величинами, мы все проделали последовательно, чтобы напомнить читателю, как это делается. Далее, в нужных местах, он все проделает самостоятельно.

Теперь мы знаем качественно правильную взаимосвязь между интересующими нас величинами. Точная формула, которую физики получают строго, от нашей отличается лишь множителем $1/6\pi$, который из соображений о размерностях, конечно же, получить нельзя, так как он безразмерный. Итак:

$$v_{\uparrow л} = F_{\uparrow}/6\pi\eta R \sim F_{\uparrow}.$$

В литературе эту формулу именуют «формулой Стокса».

Отвлечемся от наших рассуждений несколькими фразами о личности Джорджа Габриэля Стокса (1819–1903) и о значимости полученной им формулы. Этот выдающийся английский физик и математик в истории науки известен многими результатами первостепенной значимости. Они относятся и к гидродинамике, и к оптике, и к физике рентгеновских лучей, и к математической физике. Он был ученым очень широкого диапазона и существенно повлиял на облик физики второй половины прошлого века. Интересующую нас «формулу Стокса» он установил в 1851 г. и, как оказалось, ей была уготована очень плодотворная жизнь. Ею пользуются и метеорологи, изучая движение капель тумана, и химики, изучая осаждение мелких частиц в жидкостях, и гидробиологи, изучающие осаждение ила. Формула Стокса была использована Р. Милликеном в его классических опытах по определению заряда электрона. Вернемся, однако, к собственно формуле Стокса.

Записанную формулу полезно прочесть не только слева направо ($v_{\uparrow л} \sim F_{\uparrow}$), но и справа налево:

$$F_{\uparrow} = 6\pi\eta R v_{\uparrow л} \sim v_{\uparrow л}.$$

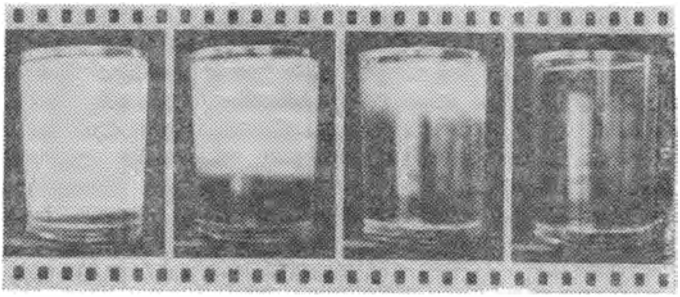
Иной раз такое прочтение обнаруживает ранее скрывавшиеся в формуле грани описываемого ею явления. Так как пузырек всплывает с постоянной скоростью, то, согласно закону Ньютона, сила, вынуждающая его движение, $F_{\uparrow}$, и сила, тормозящая его движение, $F_{\downarrow}$, между собой равны. А это означает, что $F_{\downarrow} \sim v_{\uparrow л}$, т. е. пузырек, всплывающий в режиме медленного движения, испытывает со стороны жидкости действие силы сопротивления, которая пропорциональна его скорости. Мы пришли к этому заключению, не отступая от представления о том, что всплывание медленное, что обтекание жидкостью пузырька ламинарное, без завихрений (именно это отражает индекс «л» при $v_{\uparrow л}$). Собственно, это заключение и может явиться основанием для ответа на вопрос, какое всплывание пузырька в воде следует считать медленным: такое, при котором $F_{\downarrow} \sim v_{\uparrow л}$!

Воспользуемся знанием величины $F_{\uparrow}$ в случае свободного всплывания пузырька и запишем нашу формулу в окончательном виде:

$$v_{\uparrow л} = 2\rho g R^2/9\eta \sim R^2.$$

Так как для воды вязкость $\eta \approx 10^{-3}$ кг/(м·с), плотность $\rho = 10^3$ кг/м^3, а ускорение свободного падения всегда $g \approx 10$ м/с^2, то скорость всплывания $v_{\uparrow л} = 2{,}2 \cdot 10^6 R^2$ м/с. Пузырек, радиус которого $R \approx 10^{-5}$ м, всплывает медленно, со скоростью $v_{\uparrow л} = 2{,}2 \cdot 10^{-4}$ м/с. Со дна до верха заполненного чайного стакана, высота которого $H \approx 10^{-1}$ м, такой пузырек будет всплывать за время $\tau \approx H/v_{\uparrow л} = 10^{-1}$ м/$(2{,}2 \cdot 10^{-4}$ м/с$) \approx 5 \cdot 10^2$ с! Так как $\tau \sim 1/v_{\uparrow л} \sim 1/R^2$, то пузырьки покрупнее всплывут за меньшее время.

Естественно приходит мысль о том, что опыт по свободному всплыванию «маленького» пузырька в жидкости можно использовать для определения его размера, если, разумеется, известна вязкость жидкости. Вот опыт, доступный каждому читателю. Видимо, все наблюдали, что при сильном напоре воды в водопроводной системе, стакан наполняется молочно-белой водой, которая со временем просветляется. Мутность воды обусловлена огромным количеством взвешенных в ней газовых пузырьков, рассеивающих свет. А просветление воды наступает вследствие всплывания пузырьков, о чем убедительно свидетельствует появление именно у дна стакана расширяющегося просветленного слоя. Очень легко заметить, как со временем увеличивается ширина просветленного слоя. Располагая лишь часами и линейкой можно убедиться, что граница между мутной и прозрачной зоной движется с постоянной скоростью, и определить эту скорость.



Постепенное просветление стакана с газированной водой вследствие всплывания пузырьков

Мы этот опыт проделывали и нашли, что $v_{\uparrow л} \approx 10^{-3}$ м/с. Согласно Стоксу, с такой скоростью должен всплывать пузырек, радиус которого $R \approx 2 \cdot 10^{-5}$ м.

В совсем простом опыте со стаканом обычной воды мы, веря формуле Стокса, фактически измерили размер не видимого глазом пузырька. Ведь мы не видели отдельные пузырьки, а лишь наблюдали эффект рассеяния света множеством пузырьков и расширение у дна стакана прозрачного слоя воды, освободившегося от всплывших пузырьков.

Если мы захотим проверить, как формула Стокса согласуется с опытом, всякий раз наблюдая пузырек покрупнее, мы убедимся, что начиная с некоторых размеров сферических пузырьков формула Стокса начинает отказывать. Ну, скажем, пузырек, радиус которого $R \approx 10^{-3}$ м, должен по Стоксу всплывать со скоростью

$v = 2{,}2$ м/с, а этого, конечно же, не происходит, он движется существенно медленнее.

Видимо, при увеличении размера пузырька происходит нечто серьезное, видимо, ламинарное, вязкое обтекание пузырька жидкостью для свободно всплывающих пузырьков такого размера почему-то не имеет места, почему-то они не подчиняются закону всплывания «по Стоксу», когда $F_{\downarrow} \sim v_{\uparrow л}$. Видимо, они начинают всплывать как-то по-иному.

Поговорим об этом, как и прежде, полагая, что пузырьки сохраняют сферическую форму. Начиная с некоторой скорости всплывания могло бы оказаться, что при ламинарном обтекании жидкостью пузырька от его лобовой поверхности не будет успевать уводиться нужное количество жидкости. Тогда обязан объявиться иной характер движения жидкости, при котором быстрое перемещение пузырька станет возможным. Этот «иной характер» движения может оказаться, например, следующим. От лобовой поверхности пузырька подгоняемая им жидкость перемещается быстро в направлении движущегося пузырька. В таком режиме движения жидкость в недостаточной степени затекает «в тыл» движущегося пузырька. И в его «тылу» могут возникнуть пустоты, разрывы, завихрения — все то, что в совокупности именуют «турбулентным» течением жидкости. На рисунке (см. с. 87) это изображено. В отличие от того (рис. *а*), на котором изображено ламинарное движение, на рис. *б* линии искривляются, изображая вихри. Такое движение жидкости, действительно, возникает. Ему свойственна не упорядоченность вязкого течения, не взаимные соскальзывания соприкасающихся слоев жидкости, а образование завихрений в «тылу» движущегося пузырька. Упорядоченное вязкое течение сменяется вихревым, турбулентным.

Теперь обсудим связь между выталкивающей силой $F_{\uparrow}$ и скоростью всплывания пузырька $v_{\uparrow т}$ для случая, когда обнаруживается этот второй, турбулентный, характер движения жидкости у пузырька. Двигаясь со скоростью $v_{\uparrow т}$ и пройдя путь l, пузырек передаст массе жидкости $m = \pi R^2 l\rho$ энергию

$$W = -mv_{\uparrow т}^2/2 = -\pi R^2 l\rho v_{\uparrow т}^2/2.$$

Эту энергию жидкость растратит на образование и движение завихрений. В конечном счете она превратится в тепло. Так как при равномерном движении

$F_{\uparrow} = F_{\downarrow} = -W/l$, то

$$F_{\downarrow} = \pi R^2 \rho v_{\uparrow\text{т}}^2 \sim v_{\uparrow\text{т}}^2.$$

Величину $F_{\uparrow}$ мы знаем (в начале очерка она встречалась) и, следовательно, легко получим приближенную формулу, определяющую $v_{\uparrow\text{т}}$:

$$v_{\uparrow\text{т}} = (8Rg/3)^{1/2} \sim R^{1/2}.$$

Напомню, что, обсуждая падение мыльного пузыря, мы уже пользовались соображениями, которые здесь привели нас к определению $v_{\uparrow\text{т}}$. Это означает, что в том расчете мы молчаливо предполагали, что воздух обтекает мыльный пузырь в режиме турбулентного течения.

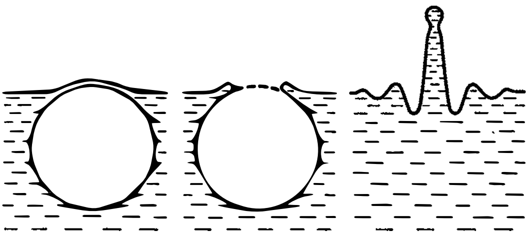
Последнюю формулу можно было бы получить, пользуясь соображениями о размерностях, которые ранее успешно привели нас к формуле, определяющей $v_{\uparrow\text{л}}$. Сделаем это. Действительно, $v_{\uparrow\text{т}}$ от вязкости зависеть не должна, так как не вязкое течение определяет потоки жидкости от лобовой поверхности пузырька к тыльной, а вихревое. А если так, то в нашем распоряжении остаются лишь такие величины: радиус пузырька R, ускорение силы тяжести g (оно определяет силу $F_{\uparrow}$) и плотность жидкости ρ. В конечную формулу ρ войти не должно, так как в размерность $v_{\uparrow\text{т}}$ размерность массы не входит, а из иных величин размерность массы входит лишь в размерность ρ. Остаются R и g. Лишь одна их комбинация $(Rg)^{1/2}$ имеет размерность скорости. В этом теперь вы можете убедиться и без моей помощи. Напомню, что при ламинарном движении $v_{\uparrow\text{л}} \sim R^2$. Чуть раньше мы и этот результат получили из соображений размерности.

Мы подошли к важному результату: при свободном всплывании пузырька в режиме ламинарного течения воды $F_{\downarrow} \sim v_{\uparrow\text{л}}$, а в режиме турбулентного течения $F_{\downarrow} \sim v_{\uparrow\text{т}}^2$. Это означает, что с ростом скорости всплывания при турбулентном течении сопротивление жидкости движению пузырька увеличивается быстрее, чем при ламинарном.

Ранее мы говорили о том, что при «некоторой скорости» ламинарное обтекание пузырька жидкостью сменится турбулентным. Теперь эту скорость можно оценить, приравняв силы, тормозящие пузырек, $F_{\downarrow}$, и относящиеся к ламинарному и к турбулентному течениям. Из такого сравнения следует, что если выполняется условие $Rv \ll \eta/\rho$, то пузырек всплывает в ламинарном режиме, а если $Rv \gg \eta/\rho$ — в турбулентном. Для воды $\eta/\rho \approx \approx 10^{-6}$ м^2/с, а для воздуха $\eta/\rho \approx 10^{-5}$ м^2/с. Пузырьки, имеющие радиус $R \approx 10^{-5}$ м, всплывают со скоростью $v_\uparrow = 10^{-3}$ м/с, т. е. $Rv_\uparrow \approx 10^{-8}$ м^2/с, что существенно меньше, чем $\eta/\rho \approx 10^{-6}$ м^2/с. Такие водяные пузырьки всплывают «ламинарно». А мыльные пузыри, радиус которых $R \approx 10^{-2}$ м, падают со скоростью $v_\downarrow \approx 15 \cdot 10^{-2}$ м/с. Значение $Rv_\downarrow \approx 15 \cdot 10^{-4}$ м^2/с существенно больше, чем $\eta/\rho \approx 10^{-5}$ м^2/с и, следовательно, такие мыльные пузыри падают в турбулентном режиме.

Ну вот, пожалуй, на этом можно бы и закончить разговор о маленьких сферических пузырьках, свободно всплывающих в воде. О больших — в одном из следующих очерков.

Очень коротко расскажу еще о судьбе пузырька, который всплыл на поверхность воды, и, на какое-то время сохранив себя, задержался на ней.



Лопнувший пузырек на поверхности жидкости образует водяной столбик и круговую волну. Последовательные стадии процесса

Вначале, достигнув поверхности, пузырек тратит некоторое время на то, чтобы из режима движения перейти в режим покоя, остановиться. При этом он колеблется, меняет свою форму и немного объем. А затем, решив для себя проблему уменьшения избыточной энергии, пузырек успокаивается. Его дальнейшая судьба в значительной мере подчинена воле случая: все всплывшие пузырьки рано или поздно лопаются, лопнет и тот, за которым мы следим. Подчеркну: так произойдет, если всплывший пузырек имел малую кинетическую энергию и не пробил поверхностную пленку, а задержался под ней.

Интересное явление сопутствует разрушению пузырька. Жидкая пленка, отверстие в которой возрастает, как бы втягивается в толщу жидкости, которая заполняет углубление в ней (см. рисунок), устремляясь к центру этого углубления. Физики, изучавшие этот процесс, утверждают, что вокруг разрушающегося пузыря возникает кольцевая волна. Смыкаясь у дна бывшего пузыря, она выплескивает жидкость вверх в виде столбика, от которого отделяются капли. От подножья столбика распространяется волна.

Описанное явление очень удобно наблюдать, стоя по грудь в воде. Если рукой быстро разрезать воду, на ее поверхности появится множество крупных пузырей. Понаблюдайте за ними: они лопаются, поверхность вздрагивает и возникают круговые волны. Подобный опыт я вам советовал сделать по другому поводу.

Рассказ о пузырьке, покоящемся в жидкости

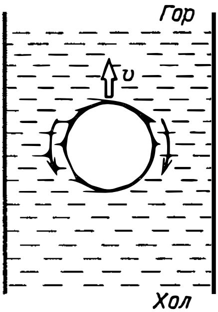
Не прилипшем к сосуду, в котором налита жидкость, а покоящемся в объеме жидкости.

Как-то в одном из научных журналов я прочел описание опыта, который мне запомнился не потому, что его результат был особенным, неожиданным, а потому, что уж очень красиво опыт был поставлен. Героем опыта был газовый пузырек, и поэтому есть основания рассказать об этом опыте. Расскажу, а потом попытаемся осмыслить его результат. Высокий стеклянный сосуд экспериментаторы заполняли силиконовым маслом, в котором искусственно поддерживали разность температуры: внизу сосуда температура выше, а у поверхности масла — ниже. В другой жидкости эта разность температуры привела бы к движению жидкости — теплые слои жидкости всплывали бы. А вот силиконовое масло, плотность которого от температуры почти не зависит, будет покоиться, несмотря на разность температуры. Именно потому экспериментаторы его и избрали для своего опыта. В объем масла они запускали пузырьки разных размеров от $R=2\cdot10^{-5}$ м до $R=2\cdot10^{-4}$ м и убедились в том, что для каждого перепада температуры, т. е. разности температуры на единичной длине ($\Delta T/\Delta x$), существуют пузырьки некоторого определенного радиуса R^*, которые будут в жидкости покоиться. Чем больше перепад, тем больше радиус покоящегося пузырька. Это —

результат опыта, зависимость $R^* \sim \Delta T/\Delta x$ соблюдалась точно. По-моему, очень красиво – пузырек, покоящийся в жидкости.

Такой пузырек – прямое указание на то, что в условиях опыта кроме выталкивающей силы на него действовала равная ей по величине и противоположно направленная иная сила. Она, видимо, обусловлена существованием перепада температуры. Иной причины, вроде, нет: не видно.

Обозначим эту силу $F_т$ и подумаем о ней, о ее происхождении, о ее физическом смысле. Представим себе свободную поверхность жидкости, вдоль которой поддерживается постоянный перепад температуры: слева температура ниже а справа – выше. С повышением температуры поверхностное натяжение жидкости уменьшается. Поэтому слева поверхностное натяжение будет большим, чем справа и, следовательно, поверхностный слой жидкости, гонимый перепадом поверхностного натяжения $\Delta\alpha/\Delta x$, будет перемещаться налево в область более холодную. В том, что дело обстоит именно так, физики убедились с помощью очень простого опыта: на поверхности стекла располагали капли вещества, которое стекло не смачивает (или смачивает ограниченно), поддерживали вдоль стекла перепад температуры и видели, как капля перемещается к холоду. Она перемещается так же, как трактор на гусеничном ходу: движутся поверхностные слои капли а перемещается она вся целиком.



В неоднородно нагретой жидкости пузырек движется к теплу

Аналогичные причины заставляют перемещаться и пузырек в воде с перепадом температуры, но в отличие от капли он будет перемещаться не к холоду, а к теплу жидкость – к холоду, а пузырек – к теплу.

Вычислить силу, тянущую пузырек, не просто, а результат вычислений оказывается очень простым:

$$F_т = -\pi R^2 \Delta\alpha/\Delta x = -\pi R^2 \varkappa \Delta T/\Delta x.$$

В этой формуле $\varkappa = \Delta\alpha/\Delta T$ – величина, которая показывает, насколько изменится поверхностное натяжение жидкости при изменении ее температуры на один граду (температурный коэффициент поверхностного натяжения). Она имеет размерность Дж/(м$^2 \cdot$ К) и для наиболее распространенных жидкостей сообщается во всех сборниках физических констант. А величина $\Delta T/\Delta x$ указывает, на сколько градусов изменяется температура жидкости на расстоянии один метр. Она имеет размерность К/м и ни в каких сборниках физических констант не значится, так как не является характеристикой жидкости, а зависит от условий опыта, созданных экспериментатором.

Вот теперь, зная силы $F_{\uparrow}$ (выталкивающую силу) и $F_{т}$, приложенные к пузырьку и направленные противоположно, мы можем обсудить этот интересный опыт.

Пузырек радиусом R^* покоится. Это значит, что действуют равные силы: $F_{\uparrow} = F_{т}$, т. е.

$$(4\pi/3)\, R^{*3} \rho g = \pi R^{*2} \varkappa\, \Delta T/\Delta x.$$

Из записанного равенства следует

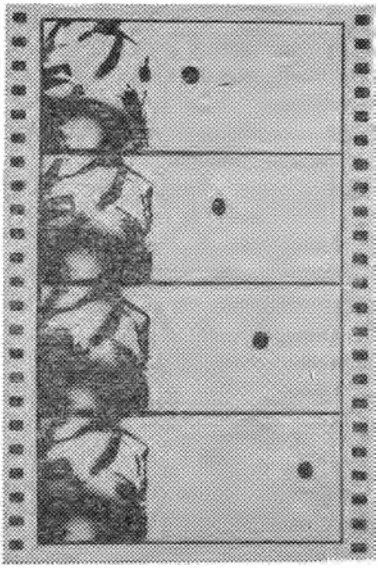
$$R^* \approx 3\varkappa/4\rho g\, (\Delta T/\Delta x) \sim \Delta T/\Delta x.$$

Мы получили то же, что и экспериментаторы: $R^* \sim \Delta T/\Delta x$. Из нашей формулы в согласии с опытом следует, что при $\Delta T/\Delta x = 10^{-1}$ К/м пузырек, имеющий радиус $R^* \approx 2 \cdot 10^{-5}$ м, будет покоиться.

Наш рассказ о покоящемся пузырьке можно бы на этом и окончить. Стоит, однако, обратить внимание на то, что для объяснения опыта мы воспользовались равенством $F_{\uparrow} = F_{т}$. А ведь могут быть и иные соотношения между этими силами.

Так, например, если $F_{\uparrow} > F_{т}$, пузырек будет всплывать, но медленнее, чем в отсутствие силы $F_{т}$. А при $F_{\uparrow} < F_{т}$ он должен тонуть. Повторю: свободный газовый пузырек в жидкости будет тонуть! А если силы $F_{т}$ и $F_{\uparrow}$ направлены под углом друг к другу? Пузырек будет двигаться вдоль направления равнодействующей этих двух сил, разумеется, если его начальная скорость была равна нулю. А если перепад температуры в объеме жидкости неоднороден? Пузырек будет двигаться по криволинейной траектории.

Здесь мне вспомнилось одно наблюдение, явно свидетельствующее о реальности силы $F_{т}$. Оно было сделано в опытах, в которых изучалось плавление кристаллической пластинки нафталина (да и не только нафталина), расположенной между двумя стеклами. В пластинке содержались газовые пузырьки. Вдоль плавящейся



Плавящаяся пластинка нафталина выбрасывает из себя пузырьки, которые движутся к теплу

пластинки поддерживался перепад температуры, фронт плавления перемещался от более горячей области в более холодную, оставляя перед собой расплав. В этих опытах можно было отчетливо наблюдать, как газовый пузырек, оказавшись на фронте кристалл – расплав и освободившись от кристаллического окружения, начинал двигаться в расплаве по направлению к теплу. Реальность этого эффекта (а с ним и силы $F_т$) отчетливо иллюстрируется кинограммой.

И, наконец, последнее замечание. В природе сила $F_т$ проявляет себя часто и отчетливо. Например, в поверхностных слоях почвы, где имеются значительные перепады температуры. Их чувствует и вода, и имеющиеся в них пузырьки.

Модельный опыт по флотации

Об этом опыте следует рассказать, так как он отчетливо иллюстрирует физическое явление, на котором основан широко распространенный технологический процесс, именуемый флотацией. Газовые пузырьки в этом процессе играют главенствующую роль.

Вначале несколько фраз о флотации, или точнее – о флотационном обогащении. Так называется процесс разделения совокупности двух видов мелких твердых частиц, отличающихся смачиваемостью той жидкостью, в которой они находятся, чаще всего водой. На поверхности частиц, которые плохо смачиваются жидкостью, охотно будут закрепляться газовые пузырьки. Говорят так: образуется флотационный агрегат – частица и прилипшие к ней пузырьки газа. Если средняя плотность такого агрегата ρ_a меньше плотности жидкости, он будет всплывать, вынося на поверхность жидкости частицы твердой фазы. Те же частицы, которые хорошо смачиваются жидкостью, не будут на себе задерживать пузырьки газа, не сформируют флотационный агрегат и, следовательно, осядут на дно. В этом процессе частицы первого и второго вида разделятся.

Принципиальная возможность разделения твердых частиц различных сортов с помощью всплывающих газовых пузырьков, в частности, широко используется для разделения частиц пустой породы в измельченной руде от частиц, богатых металлом. Именно поэтому явление флотации лежит в основе технологического процесса, используемого в горнорудных обогатительных фабриках. Этого одного примера достаточно, чтобы понять, насколько важна флотация, используемая и во многих иных технологических процессах.

У читателя, видимо, возникли вопросы. Например, такие. Как образуются газовые пузырьки во флотационной ванне с жидкостью и частицами твердой породы? При каком соотношении объемов газовых пузырьков и твердых частиц образуемые ими флотационные агрегаты будут всплывать? Возможно, возникли и иные вопросы. Ответим на два сформулированных, они представляются важными.

Введение газовых пузырьков в объем флотационной волны осуществляется многими различными приемами. Иногда просто продувают воздух через сетки с малыми отверстиями, иногда в объеме ванны проводят химическую реакцию, при которой возникает большое количество газа, например, углекислого. Существует так называемая электрофлотация, при которой в ванне образуются газообразные водород и кислород при пропускании тока через воду. Все эти приемы дают возможность регулировать интенсивность процесса формирования газовых пузырьков.

Теперь – о флотационном агрегате. Он будет всплывать при условии, если его средняя плотность $\rho_а$ будет меньше плотности жидкости $\rho_ж$, т. е. $\rho_а < \rho_ж$. Из записанного неравенства легко получить условие всплывания флотационного агрегата, в состав которого входит твердая частица, имеющая массу $m_ч$, объем $V_ч$ (плотность $\rho_ч = m_ч/V_ч$), и газовые пузырьки, суммарный объем которых $V_г$. Очевидно,

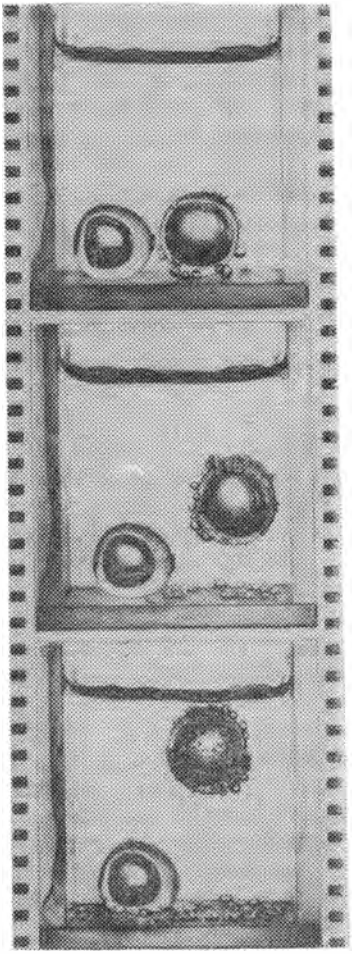
$$\rho_а = m_ч/(V_ч + V_г) = \rho_ч/(1 + V_г/V_ч),$$

и, следовательно, условие всплывания можно записать в виде

$$V_г/V_ч > (\rho_ч\rho_ж) - 1.$$

Очевидно, записанное условие всплывания флотационного агрегата выполняется тем лучше, чем меньше объем частиц твердой фазы.

Вот теперь о модельном опыте, обещанном в заглавии очерка. Для его проведения мы изготовили полые стеклянные шарики, которые в воде не падали стремительно, а медленно тонули, так как их плотность была немногим больше плотности воды. Шарики были крупными ($R \approx 5$ мм). А далее все предельно просто. Брали два шарика, один из них тщательно протирали жирными пальцами, а поверхность другого обезжиривали спиртом. После такой обработки на первом шарике должны оседать газовые пузырьки, а на втором — нет.



Модельный опыт по флотации

Первый моделирует вещество гидрофобное, не любящее воду, не смачиваемое водой, а второй — гидрофильное, любящее воду, смачиваемое ею. Шарики клали на дно стакана и заполняли стакан обычной газированной минеральной водой, из которой выделялись газовые пузырьки. На шарике с жирной поверхностью начинали оседать пузырьки, образовывался флотационный агрегат и вскоре шарик всплывал. Вот, собственно, и весь опыт, иллюстрирующий флотационное разделение частиц, поверхность которых обнаруживает разное сродство к газовым пузырькам.

В описанной постановке опыта, когда всплывает один шарик, поверхность которого заселена пузырьками, наблюдается любопытное сопутствующее явление. В момент, когда шарик касается поверхности, некоторые пузырьки из числа поднимавших шарик лопаются и он начинает тонуть. А затем, обогатившись очередной порцией газовых пузырьков, выделяющихся из воды, он снова всплывает, и цикл повторяется. Легко понять, что в реальном флотационном процессе, в котором участвует огромное количество всплывающих частиц, у поверхности жидкости будет возникать слой, обогащенный частицами определенного сорта, каждая из которых, разумеется, тонуть не будет. Это так называемый слой флотационной, минерализованной пены. Искусственно (или самотеком) эта пена удаляется вместе с содержащимися в ней частицами либо полезного минерала, либо пустой породы. Технологам приемлемы оба варианта, только бы произошло отделение частиц минерала, обогащенного полезным ископаемым. Это и было целью флотационного процесса.

О «мягких» и «твердых» пузырьках в жидкости

«Мягкие» – значит легко деформируемые внешней силой, «твердые» – значит не поддающиеся ее воздействию. Будем придерживаться этих, не очень строгих определений и попытаемся применить их к газовым пузырям в жидкости.

Для того чтобы не заблудиться в понятиях «мягкий» и «твердый», решим вначале задачу о связи между числом атомов газа, заключенных в пузыре, и его радиусом R, полагая при этом, что жидкость, в объеме которой расположен пузырь, находится под постоянным давлением P_0. В поисках интересующей нас связи мы будем считать, что пузырь «равновесный», или лучше сказать «уравновешенный», а это означает, что его стенка не перемещается ни от центра пузыря, ни к его центру. Попросту говоря, неизменяющийся пузырь существует и всё тут. В этом случае давление заключенного в нем газа, $P_г$, стремящегося раздуть пузырь, компенсируется давлением, приложенным к жидкости извне, P_0, и лапласовским давлением, которое обусловлено искривленностью поверхности пузыря $2\alpha/R$. Эти два давления вместе стремятся сжать пузырь.

Давление газа $P_г$, заключенного в пузыре, можно определить из закона Менделеева — Клайперона, известного из школьного курса физики:

$$P_г V = N_г kT,$$

где $N_г$ — число молекул газа в пузыре. Так как $V = 4\pi R^3/3$, то

$$P_г = 3N_г kT/4\pi R^3.$$

Равенство растягивающего и сжимающего давлений, осуществляющееся в условиях равновесия, мы запишем следующей главной формулой очерка:

$$3N_г kT/4\pi R^3 = P_0 + 2\alpha/R, \text{ или } N_г = (4\pi R^3/3kT)(P_0 + 2\alpha/R).$$

Записанная формула и выражает интересующую нас связь между $N_г$ и R. Подобная формула нам уже встречалась в очерке об энергии мыльного пузыря. Там, однако, обсуждалась не одна, а две поверхности, создающие лапласовское давление, и интересовались мы не всеми газовыми молекулами, а лишь той их долей, которая необходима для компенсации этого давления.

Та внешняя сила, которой можно «щупать» пузырь для того, чтобы выяснить «мягкий» он или «твердый», определяется давлением P_0. Его мы можем изменять по собственному желанию. Если $P_0 \ll 2\alpha/R$, то, изменяя P_0 (разумеется, не нарушая неравенства), мы никак не повлияем на размер пузыря, который сильно сжат собственным, лапласовским давлением, значительно большим, чем внешнее. Повторю сказанное иными словами: если радиус пузыря настолько мал, что $R \ll 2\alpha/P_0$ — внешнее давление пренебрежимо мало по сравнению с лапласовским и поэтому меняй — не меняй давление P_0, до тех пор пока это неравенство сохраняется, пузырь сохранит свой радиус. А это и значит, что он твердый! А вот в случае, когда $P_0 \gg 2\alpha/R$, лапласовское давление значительно меньше внешнего и поэтому любое давление будет приводить к изменению радиуса пузыря. Больше давление — меньше радиус, меньше давление — больше радиус. Это — «мягкий» пузырь, он чувствует внешнее давление. Увеличивая внешнее давление, его можно сжать.

Для того чтобы наши рассуждения обрели количественную меру, оценим радиус пузыря R^*, который сжимается лапласовским давлением, равным внешнему P_0. Такой пузырь является как бы пограничным между «мягкими» и «твердыми» пузырями. Если внешнее давление равно атмосферному, то

$$R^* = 2\alpha/P_0 \approx \frac{1{,}4 \cdot 10^{-1} \text{ Дж/м}^2}{10^5 \text{ Дж/м}^3} = 1{,}4 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Итак, «твердые» пузыри в воде — это те, радиус которых значительно меньше микрометра, а «мягкие» — это те, радиус которых значительно больше микрометра.

«Мягкие» и «твердые» пузыри отличаются не только размерами. Оказывается, что во многих реальных ситуациях они обнаруживают различные свойства и различное поведение. Здесь я расскажу об одном различии в их поведении, проявляющемся при слиянии пузырей.

Для «мягкого» пузырька, когда лапласовским давлением можно пренебречь, из главной формулы очерка следует $N_\text{г} \sim R^3$. Это означает, что при объединении двух «мягких» пузырей будут суммироваться их объемы, так как суммируется число газовых молекул. Из этого обстоятельства проистекают два важных следствия. Очень важных! Во-первых, оно означает, что объем образовавшегося пузыря равен сумме объемов объединившихся. Во-вторых, оказывается, что два объединившихся пузыря имеют поверхность меньшую, чем та, которую они имели до объединения. Действительно, условие суммирования объемов двух пузырей, радиусы которых R_1 и R_2, означает, что

$$R^3 = R_1^3 + R_2^3.$$

Это равенство можно переписать в иной форме:

$$R^2 = R_1^2 (R_1/R) + R_2^2 (R_2/R).$$

Так как $(R_1/R) < 1$ и $(R_2/R) < 1$, то

$$R^2 < R_1^2 + R_2^2.$$

Именно в этом неравенстве и содержится энергетическое оправдание объединения «мягких» пузырей: энергия заключенного в них газа не меняется, а связанная с ними поверхностная энергия уменьшается. Так что в процессе слияния общая энергия уменьшается — слияние «мягких» пузырей энергетически выгодно.

Теперь о слиянии «твердых» пузырей. Для них из главной формулы следует $N_{\text{г}} \sim R^2$. Это значит, что при слиянии таких пузырей суммируются не их объемы, а поверхности:

$$R^2 = R_1^2 + R_2^2.$$

При этом, как следует из наших предыдущих формул, объем суммарного пузыря должен превосходить сумму объемов слившихся пузырей:

$$R^3 > R_1^3 + R_2^3.$$

У нас есть основание сделать вывод: при слиянии «твердых» пузырей поверхность, а значит, и энергия поверхности, остаются неизменными. Казалось бы, и объединяться им нечего. Есть, однако, оправдание процесса слияния твердых пузырей. Оно заключается в том, что слиянию пузырей сопутствует расширение газа. Более мотивированный ответ сложен, и мы его оставим за пределами очерка.

Газовый пузырек у границы между жидкостями

Очерк посвящен явлению, которое обнаруживает себя не только в искусственных, нарочито созданных ситуациях. Газовый пузырек, проходящий через границу между жидкостями, – участник многих очень важных технологических процессов. Вот пример такого процесса. Для того чтобы выплавляемый металл был высококачественным, тщательно перемешанным, сквозь жидкий расплав пропускают пузырьки газа. Производят, как говорят металлурги, барботаж расплава. В виде пузырьков газ проходит и сквозь слой металла, и сквозь слой находящегося на нем жидкого шлака. А между слоями – граница, и пузырьки газа должны ее преодолеть. Для металлургов очень важно знать закономерности этого процесса. Можно привести и иные примеры, но этот, по-моему, достаточно убедителен, чтобы оправдать рассказ о пузырьке, проходящем через границу между жидкостями.

Вначале попробуем представить себе судьбу газового пузырька радиуса R, расположенного в нижней жидкости вблизи границы между нижней и верхней жидкостями. Для облегчения нашей задачи упростим ее и предположим, что плотности жидкостей одинаковы и равны ρ и, следовательно, выталкивающая сила от сорта жидкости не зависит. Предположим вначале, что граница между жидкостями остается плоской, когда пузырек пытается пройти сквозь нее. Жидкости отличаются коэффициентами поверхностного натяжения $\alpha_н$ и $\alpha_в$, а граница между ними характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения $\alpha_{нв}$.

Мыслимы две судьбы газового пузырька: либо он пройдет сквозь границу, либо задержится границей и останется на ней.

Судьба газового пузырька определится совместным действием трех сил. Перечислим и оценим эти силы. Одна из них – выталкивающая сила $F_\uparrow$ – обусловлена уменьшением потенциальной энергии $W_п$ всплывающего пузырька. Вторая сила $F_{гр}$ обусловлена тем, что прохождению пузырька сквозь границу сопутствует исчезновение части поверхности границы и, следовательно, уменьшение энергии системы $W_{гр}$ на значение произведения площади этой поверхности на $\alpha_{нв}$. Третья сила F_s определяется тем, что при движении пузырька через границу меняется соотношение между площадями поверхности пузырька, где коэффициенты поверхностного натяжения $\alpha_н$ и $\alpha_в$ различны. При этом, разумеется, изменяется поверхностная энергия, связанная со всей поверхностью пузырька W_s.

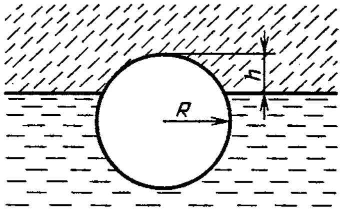


Схема плоской границы между жидкостями, «пробиваемой» всплывающим пузырьком

Для того чтобы оценить эти силы, мы поступим следующим образом: расположим пузырь на границе так, чтобы его вершина отстояла от границы на расстояние h. Затем сместим пузырек вверх на расстояние Δh и вычислим происходящее при этом изменение всех трех упоминавшихся слагаемых энергии, связанных с пузырьком на границе. Вспомнив, что изменение энергии равно взятому с обратным знаком произведению действующей силы на путь (в данном случае Δh), мы легко найдем интересующие нас силы. А потом, сложив все три силы, найдем ту, которая и определяет судьбу пузырька.

Уменьшение потенциальной энергии пузырька при его смещении на Δh равно $\Delta W_п = -4\pi R^3 \rho g \Delta h/3$ и, следовательно,

$$F\uparrow = -\Delta W_{п}/\Delta h = 4\pi R^3 \rho g/3.$$

Это – первая сила.

Уменьшение граничной энергии, связанное с исчезновением части границы, определится формулой $W_{гр} = -\pi\alpha_{нв}[R^2 - (R-h)^2]$. Изменение этой величины при переходе от h к $h+\Delta h$ (в предположении, что $\Delta h \ll h$) равно $\Delta W_{гр} = -2\pi\alpha_{нв}\Delta h(R-h)$ и, следовательно,

$$F_{гр} = -\Delta W_{гр}/\Delta h = 2\pi\alpha_{нв}(R-h).$$

Это – вторая сила.

Энергия $W_S = \alpha_в S_в + \alpha_н(4\pi R^2 - S_в)$, где $S_в = 2\pi Rh$ – площадь поверхности пузырька, ограниченная верхней жидкостью; после смещения пузырька на Δh величина W_S изменяется на $\Delta W_S = 2\pi R(\alpha_в - \alpha_н)\Delta h$ и, таким образом,

$$F_S = -\Delta W_S/\Delta h = -2\pi R(\alpha_в - \alpha_н).$$

Это – третья сила.

Вот теперь можно записать силу, действующую на пузырек, расположенный на границе:

$$F = 4\pi R^3\rho g/3 + 2\pi\alpha_{нв}(R-h) - 2\pi R(\alpha_в - \alpha_н).$$

Пузырек прекратит всплывание при $F=0$, т. е. при

$$h^* = \frac{(2/3)\rho g R^3 - R(\alpha_в - \alpha_н - \alpha_{нв})}{\alpha_{нв}}.$$

А происходит это именно на границе при условии, что $0 \leqslant h^* \leqslant 2R$. Из этого условия (при $h^* = 2R$) следует, что задержаться на границе могут пузырьки, радиус которых меньше некоторого критического R^*:

$$R^* \approx 1{,}2\left[\frac{\alpha_{нв} + (\alpha_в - \alpha_н)}{\rho g}\right]^{1/2}.$$

Формулу, следующую из нашего расчета, можно получить, пользуясь лишь соображениями о размерностях. Читатель это сделает сам, я лишь подскажу ему, что судьба пузырька на границе зависит от выталкивающей архимедовой силы (т. е. от величин R, g и ρ) и от сил, которые определяются изменением граничной энергии, связанной с поверхностью пузыря (они зависят от R и суммы $\alpha_{нв} + (\alpha_в - \alpha_н)$):

$$R^* = \varphi[\rho,\ g,\ \alpha_{нв} + (\alpha_в - \alpha_н)].$$

Если потребовать совпадения размерностей слева и справа в записанном уравнении, то, поступив так, как мы это сделали на с. 89, мы получим формулу, определяющую R^* и с точностью до множителя 1,2 совпадающую с той, которую мы получили, выполнив расчет.

Итак, формула есть, обсудим ее.

При $\alpha_в < \alpha_н$ может оказаться, что $[\alpha_{нв} + (\alpha_в - \alpha_н)] < 0$. В этом случае $R^* < 0$ и граница должна быть проницаема для пузырьков любого размера. Если же $\alpha_в > \alpha_н$, то всегда $R^* > 0$. Скажем, для металлов $\alpha_{нв} \approx 10^{-2}$ Дж/м^2, $\alpha_в - \alpha_н \approx 10^{-1}$ Дж/м^2 и, таким образом, $R^* \approx 3 \cdot 10^{-3}$ м. Это означает, что на границе застрянут миллиметровые и более мелкие пузырьки.

Но элементарный расчет может иметь отношение к действительности лишь в случае, если подход пузырька к границе снизу сопровождается ее прорывом при соприкосновении пузырька с жидкостью верхнего слоя. Такая ситуация вполне реальна. Во многих же случаях действительность оказывается сложнее нашей упрощенной схемы и преодоление пузырьком границы происходит совсем не так, как мы это предполагали в нашем расчете. Обсудим и иной механизм преодоления границы пузырьком.

Вначале о результатах совсем простых опытов. Условия их проведения почти полностью определены названием очерка: в сосуде расположены два слоя несмешивающихся жидкостей. В объем нижней жидкости вдуваются газовые пузырьки, и они, двигаясь вверх, проходят через границу между жидкостями.

В каждом из слоев пузырьки просто всплывают. Как это происходит, мы уже знаем. А вот когда на пути пузырька оказывается граница между слоями жидкостей, возникают неожиданные явления, отличающиеся от обсужденных ранее. Они нас и интересуют. Возьмем для опыта стеклянный сосуд, нальем в него две несмешивающиеся жидкости и сквозь стекло разглядим все, что происходит на границе между ними. Если что-то не успеем заметить глазом,— воспользуемся кинокамерой.

Мы (да и не только мы) ставили опыты со слоями четыреххлористого углерода и воды. Чтобы получше все разглядеть и четче сфотографировать, четыреххлористый углерод слегка подкрашивали каплей иодной настойки. Другие экспериментировали со слоями воды и подсолнечного масла, ртути и глицерина и со многими другими парами жидкостей. В нижний слой жидкости газовые пузырьки вводились через иглу шприца. Все очень просто!

Опыты свидетельствуют о том, что явлению, которое мы наблюдали, сопутствуют два эффекта. Каждый из них красив и с точки зрения любующегося явлением природы, и с точки зрения того, кто ищет гармонию в явлении и его место в ряду иных явлений. Оказывается, что, если в объем нижней жидкости последовательно впрыскивать маленькие пузырьки, они скапливаются под границей, объединяются и, лишь достигнув определенного размера R^*, так сказать, объединив свои усилия, преодолевают границу и проникают в верхнюю жидкость. Точнее говоря, не «проникают», а «проникает» один укрупненный пузырь. Прежде чем пропустить сквозь себя пузырек, граница между жидкостями под влиянием выталкивающей силы прогибается, как бы тянется за укрупняющимся пузырьком. А затем, пропустив пузырек, она спрямляется, готовясь к сопротивлению новым пузырькам. Если, разумеется, они появятся. Итак, принципиально новое наблюдение: граница не прорывается, а прогибается, следуя за движущимся пузырьком.

Между газом, заключенным в пузырьке, и верхней жидкостью остается прослойка нижней жидкости, как это и изображено на схематическом рисунке.

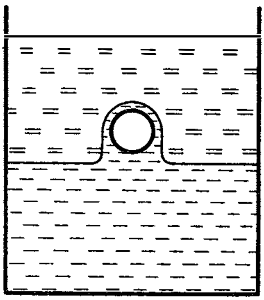
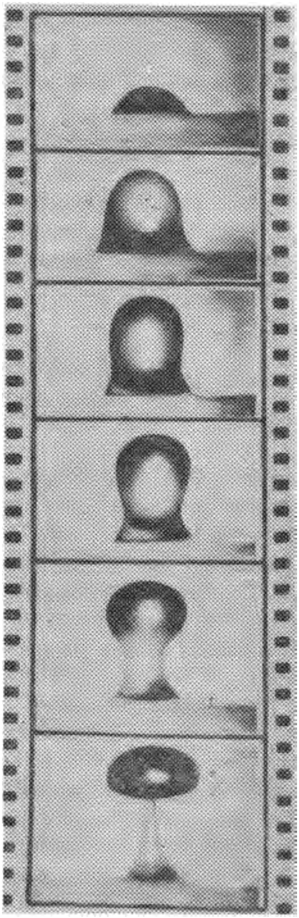


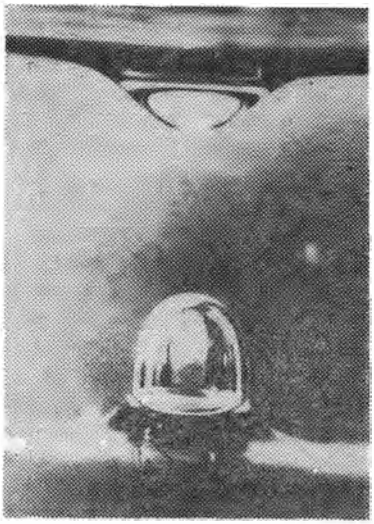
Схема границы, изгибаемой всплывающим пузырьком

Вот теперь попытаемся оценить R^*, сохранив все ранее сделанные упрощения. Будем считать, что границу преодолевает не движущийся пузырек, подобно тому, как, скажем, летящая пуля пробивает доску, а пузырек покоящийся, на который, по мере его укрупнения, действует возрастающая выталкивающая сила $F_{\uparrow}$. Это означает, что, как и ранее, мы не должны обсуждать ни скорость всплывания пузырьков, ни вязкость граничащих жидкостей, ни какие-либо иные, как говорят физики, кинетические величины.

Предположим также для простоты, что плотности граничащих жидкостей практически одинаковы и равны ρ. В рассматриваемой ситуации на пузырек, отделенный от границы между жидкостями тонким слоем нижней жидкости, действуют две силы. Одна из них – выталкивающая сила, стремящаяся продавить пузырек сквозь границу. Другая сила возникает, когда всплывающий пузырек деформирует границу между жидкостями. Эта сила стремится воспрепятствовать увеличению площади между жидкостями в том месте, где пузырек стремится ее прорвать. Эту силу $F_{\downarrow}$ мы вычислим, упростив форму границы, представив ее так, как это



Последовательные стадии прохождения пузырька через границу двух жидкостей



Пузырек, проходящий из тяжелой жидкости в легкую, часть тяжелой уносит с собой

сделано на рисунке. Истинная форма видна на кинограмме и оказывается совсем не простой, но все же допускающей принятое нами упрощение. В этом упрощении формы границы в основном и заключается упрощенность нашего расчета.

Силу $F_\downarrow$ можно оценить, следуя вот каким рассуждениям. Перемещение газового пузырька вверх сопровождается увеличением площади цилиндрической границы между верхней и нижней жидкостями. Если пузырек сместится на величину Δx, то сопутствующее этому увеличение поверхностной энергии $\Delta W = 2\pi\alpha_{\text{нв}} R\,\Delta x$. Это означает, что всплыванию пузырька будет препятствовать сила $F_\downarrow = -\Delta W_{\text{нв}}/\Delta x = -2\pi R\alpha_{\text{нв}}$. Вот теперь из условия $F_\uparrow = F_\downarrow$ мы легко определим критический размер пузырька, при котором сила $F_\uparrow$ оторвет его от столба нижней жидкости. Окутанный ею пузырек всплывает в верхней жидкости. Оценка R^* оказывается следующей:

$$R^* \approx (3\alpha_{\text{нв}}/2\rho g)^{1/2}.$$

Из формулы следует, что при разумных значениях величин, определяющих R^* ($\alpha_{\text{нв}} \approx 10^{-2}$ Дж/м^2, $\rho \approx 10^3$ кг/м^3), оказывается, что $R^* \approx 10^{-3}$ м.

В наших опытах приблизительно такой пузырек и прорывал границу между четыреххлористым углеродом и водой. Подчеркнем: приблизительно!

Теперь о втором эффекте. Он не менее красив, чем предыдущий, пожалуй, даже красивее. Оказывается, что пузырек, прорывающийся через границу в «верхнюю» жидкость, уносит с собой немного «нижней» жидкости, даже если она и тяжелее. Странно: казалось бы, зачем тяжелой жидкости подниматься в легкую? Не должно быть! А между тем это происходит.

Вот два наблюдения, доказывающих реальность эффекта. Первое было сделано в опытах с четыреххлористым углеродом, расположенным под водой. Оказалось, что, когда пузырек воздуха, преодолев границу, всплывает на поверхность воды, на ней образуется розовая лужица четыреххлористого углерода, подкрашенного иодом. После всплывания множества пузырьков вблизи поверхности воды образуется тяжелая розовая капля. Достигнув некоторого размера, она падает и сливается с нижним слоем. А затем все можно повторить снова. Приводимый кинокадр отчетливо иллюстрирует происходящее. Явно каждый пузырек, преодолевший границу, выносит на поверхность воды немного тяжелой жидкости. Впрочем, не так уж и немного. Если разделить объем розовой капли на суммарный объем всех образовавших ее пузырьков, то оказывается, что каждый из всплывших пузырьков выносит тяжелую жидкость, объем которой составляет несколько процентов объема пузырька.

Второе наблюдение было сделано экспериментаторами, которые изучали систему ртуть – глицерин. Они заметили, что, если к поверхности прорывающегося (но еще не прорвавшегося) пузырька прикоснуться металлической проволокой и через источник тока замкнуть ее на слой ртути, в цепи потечет ток. Это означает, что на поверхности пузыря имеется пленка ртути, связанная со слоем ртути. Не глицерин же замыкает цепь! Это наблюдение дважды интересно: во-первых, оно подтверждает факт выноса пузырьком тяжелой жидкости, и во-вторых, доказывает, что тяжелая жидкость выносится в виде пленки на пузырьке.

Мы уже удивлялись этому второму эффекту. Говорили: странно! Говорили: не должно быть! А вот есть! Мы сомневались, основываясь на зарекомендовавшей себя логике: самопроизвольно происходит то, что по меньшей мере не приводит к увеличению энергии. Всплывание тяжелой жидкости с этой логикой не согласуется. Она, однако, оказывается не обязательной, если речь идет об эффекте не равновесном, а кинетическом. В данном случае это значит, что если бы пузырек проходил сквозь границу «очень медленно» и «очень медленно» двигался бы в легкой жидкости, «странного» эффекта не было бы, пленка тяжелой жидкости где-нибудь прорвалась бы и стекла в слой этой жидкости. А в тех опытах, где эффект наблюдался, все происходило достаточно быстро для того, чтобы пленка сохранялась. Впрочем, в системе ртуть – глицерин, ртутная пленка рвалась вскоре после того, как пузырек отрывался от границы. А вот в опытах с четыреххлористым углеродом и водой пленка четыреххлористого углерода сохранялась и достигала поверхности воды.

Здесь уместно рассказать об одном интересном эффекте, сопутствующем прорыву пузырька в «верхнюю» жидкость. Его наблюдали в опытах, в которых на слое ртути располагался слой глицерина. Оказывается, что при прорыве пузырьком границы в объеме пузырька возникает столбик ртути, от которого отрывается капелька, уносимая пузырьком. Она, блестящая, видна на дне пузырька в глицерине.

Пузырек в капилляре с жидкостью

Речь идет не о привычных нам сферических пузырьках, расположенных в объеме жидкости, существенно превосходящем объем пузырька. Речь идет о газовых полостях в капилляре, которые ограничены торцами столбиков жидкости и поверхностью капилляра. В зависимости от того, смачивает или не смачивает жидкость поверхность капилляра, торцы будут принимать форму вогнутого или выпуклого мениска. Если таких полостей-пузырьков много, они разделены множеством жидких столбиков-прослоек. В случае смачивающих жидкостей содержимое капилляра, где чередуются воздух и жидкие перегородки, надо изображать так, как это сделано на приводимом рисунке. Впрочем, и на фотографии содержимое капилляра выглядит так же, как и на приводимом рисунке.

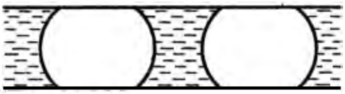
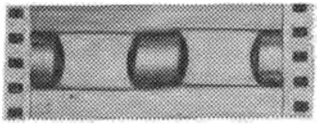


Схема расположения газовых пузырьков в капилляре со смачивающей жидкостью



Газовые пузырьки в капилляре с водой

Итак, интересующий нас объект определен, нарисован и сфотографирован. Теперь — о его свойствах и характеристиках, которые, очевидно, зависят и от свойств прослоек жидкости и от свойств газа, заполняющего полость. Мы будем интересоваться, главным образом, жидкими прослойками между газовыми полостями — пузырьками. Судьбы газовых пузырьков и жидких прослоек, разумеется, взаимообусловлены.

Прослойки обнаруживают одну крайне важную особенность. Оказывается, что для того, чтобы сдвинуть прослойку с места, нужно приложить давление, превосходящее некоторое минимальное. Это немного неожиданно. Казалось бы, жидкость в капилляре могла бы течь и при сколь угодно малом давлении, приложенном к торцу жидкого столбика извне. А вот не течет, ждет, покуда, нарастая, давление достигнет некоторого предельного значения.

Попытаемся понять, в чем здесь дело. Для того чтобы двояковогнутую прослойку-столбик сместить на расстояние x, приложив некоторое избыточное давление ΔP, нужно оголить кольцевой участок поверхности капилляра, ранее закрытый жидкостью. Этот участок имеет форму кольца, площадь которого $2\pi rx$. Затратить на это необходимо энергию $\Delta W = -2\pi rx(\alpha_с - \alpha_{жс})$, где $\alpha_{жс}$ – поверхностная энергия на границе жидкость – стекло, $\alpha_с$ – поверхностное натяжение вещества капилляра. Такая энергия может быть затрачена лишь при условии, если к поверхности жидкости будет приложена сила F^*, величина которой определится формулой $F^* = -\Delta W/x$ и, следовательно, $F^* = 2\pi r(\alpha_с - \alpha_{жс}) = 2\pi r\,\Delta\alpha$.

В этом месте читатель может усомниться в разумности излагаемых соображений, естественно подумав о том, что если смещение одного конца столбика сопровождается затратой энергии ΔW, необходимой для оголения кольцевого участка поверхности стекла, то с другого конца столбика такой же кольцевой участок поверхности стекла должен закрыться и, следовательно, выделится энергия, по абсолютной величине равная ΔW. В результате общее изменение энергии будет равно нулю и, следовательно, пороговая сила F^* также равна нулю. Разумно? Кажется, разумно! Правильным, однако, оказывается наш расчет, так как участки, где происходят поглощение и выделение энергии пространственно разделены и поэтому выделяющаяся энергия рассеивается в виде тепла и никак не может быть использована в той части жидкой прослойки, где ее смещение должно сопровождаться оголением стекла. Сила F^* в капилляре радиусом r создает давление

$$\Delta P^* = F^*/\pi r^2 = 2\,\Delta\alpha/r.$$

По мере того как давление в капилляре будет повышаться до ΔP^*, поверхности, ограничивающие жидкую прослойку, будут менять свою форму: одна будет прогибаться, а другая – спрямляться. Если счесть, что к моменту, когда избыточное давление достигнет величины ΔP^*, радиусы кривизны поверхностей, ограничивающих жидкости, будут R_1 и R_2 соответственно, можно записать, что

$$\Delta P^* = 2\alpha(1/R_1 - 1/R_2).$$

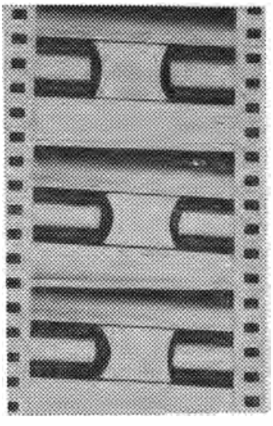
Легко понять, что если в капилляре чередуются n газовых пузырьков и разделяющих их жидких столбиков, то давление, которое необходимо приложить для смещения этой конструкции, должно в n раз превосходить найденное нами значение ΔP^*.

Вот теперь, сравнивая два выражения, определяющие ΔP^*, мы можем найти интересующую нас связь между кривизнами поверхностей, ограничивающих сдвигающийся жидкий столбик, радиусом капилляра и величинами поверхностного натяжения жидкости, стекла и границы между ними в момент, когда газовый столбик начал двигаться:

$$\Delta\alpha/\alpha = r(1/R_1 - 1/R_2).$$

Здесь следует подчеркнуть, что все рассказанное о жидком столбике, ограниченном двумя вогнутыми поверхностями жидкости, полностью относится к газовой полости-пузырьку, ограниченной двумя выпуклыми поверхностями. Если прилагать давление к одному из водяных столбиков, ограничивающих пузырек, поверхности вода – газ будут деформироваться: одна спрямляться, другая – прогибаться.

Обратимся теперь к эксперименту, цель которого – убедиться в правильности нарисованной нами качественной картины явления, определить ΔP^* и, полагая известным поверхностное натяжение жидкости, определить разность между поверхностными натяжениями стекла и границы раздела между жидкостью и стеклом. Опыт ставился со стеклянным капилляром, радиус которого $r = 5 \cdot 10^{-4}$ м. Наблюдение велось за одним водяным столбиком. Давление ΔP создавалось с помощью тонкой проволоки, конец которой был окутан слоем ваты. Проволочка с ватой играла роль поршня. Вдвигая его в капилляр, можно было сжимать газ перед водой. Приготовленный таким образом образец располагался на предметном столике микроскопа. Процесс изменения формы поверхностей, ограничивающих водяной столбик, кинематографи-



Последовательные стадии изменения формы жидкого столбика между пузырями воздуха под влиянием увеличивающегося давления ровался. Впрочем, для того чтобы просто наблюдать явление, можно обойтись и без микроскопа, и без киноаппарата, а воспользоваться лишь лупой с увеличением в 5 – 7 раз. Кинокамера в описываемых опытах потребовалась лишь для того, чтобы получить фотографии, по которым можно было бы зарегистрировать начало движения воды и определить сформировавшиеся к этому моменту кривизны поверхностей водяного столбика.

Приводимая кинограмма свидетельствует о том, что общую картину мы представляли себе правильно: давление растет, столбик, разграничивающий газовые полости, остается до поры до времени неподвижным, а лишь меняются кривизны ограничивающих его поверхностей. Теперь о количественных характеристиках, следующих из опыта. Для того чтобы водяной столбик начал двигаться в стеклянном капилляре, понадобилось избыточное давление, при котором $R_1 = 2{,}9 \cdot 10^{-4}$ м, $R_2 = 6{,}5 \cdot 10^{-4}$ м. При $\alpha = 7 \cdot 10^{-2}$ Дж/м^2 получаем $\Delta P^* \approx 2{,}5 \cdot 10^2$ Па. Из последней формулы следует, что $\Delta\alpha = 67 \cdot 10^{-3}$ Дж/м^2. Известно, что $\alpha_с \approx 13 \cdot 10^{-2}$ Дж/м^2, это сообщается в справочниках. Таким образом, мы измерили поверхностное натяжение на границе стекло – вода: $\alpha_{жс} \approx$ $\approx 63 \cdot 10^{-3}$ Дж/м^2. Строго говоря и $\alpha_с$, и, следовательно, $\alpha_{св}$ – величины приближенные, так как должны зависеть от сорта стекла. Поэтому, главным образом, порадуемся не столько тому, что мы нашли число $63 \cdot 10^{-3}$ Дж/м^2, сколько тому, что по данным нашего опыта его в принципе можно определить.

Рассказанное об особенностях поведения каждого столбика в капилляре обнаруживает себя во многих явлениях природы, а именно всегда, когда через какие-либо капилляры должен протекать газ или жидкость. Если в капилляре оказывается газовый пузырек, ему уготована роль пробки, препятствующей течению жидкости под влиянием давления $\Delta P < \Delta P^*$. Газовый пузырек в крови, заполняющий кровеносные капилляры, может оказаться смертельным, так как задержит поток крови. Медики называют это явление газовой эмболией.

Газовая эмболия может возникнуть в случае, если из среды с повышенным давлением человек быстро перейдет в среду с нормальным давлением. В тканях и в крови всегда растворен азот. Так как растворимость азота уменьшается с уменьшением давления, то при быстром его понижении свободный азот выделяется в кровь и в ней образуются пузырьки, заполненные азотом, которые могут сыграть роль пробок, препятствующих потоку крови. Именно поэтому водолазы из глубины, где они находятся под повышенным давлением, должны подниматься на поверхность воды достаточно медленно, так, чтобы успевали устанавливаться равновесные концентрации газов в крови. Именно такой прием может гарантировать от газовой эмболии.

Можно было бы привести и иные, менее грустные примеры, относящиеся к движению жидкости в древесине, в капиллярах различных технологических научных устройств и приборов. Читатель, наверное, и сам припомнит другие примеры.

Бутылка газированной воды

Прежде чем мы откупорим бутылку с газированной водой, подумаем над ее содержимым. В ней около $5 \cdot 10^{-4}$ м^3 газированной воды ($V_{\text{вод}}$) и над водой около $5 \cdot 10^{-6}$ м^3 свободного газа ($V_{\text{г}}$). И газ, и вода находятся под давлением от 1,2 до 1,5 атм*). Хорошо газированная вода под бóльшим, плохо – под меньшим давлением. Сочтем, что вода в нашей бутылке газирована хорошо и давление над ней $P \approx 1{,}5$ атм.

Общее число газовых молекул в бутылке слагается из тех, которые находятся над водой ($N_{\text{г}}$), и тех, которые растворены в воде ($N_{\text{вод}}$).

Значение $N_{\text{г}}$ мы легко вычислим, воспользовавшись известной формулой: $N_{\text{г}} = PV/kT \approx 1{,}5 \cdot 10^{20}$.

Число молекул $N_{\text{вод}}$ вычислить чуть посложнее. Не станем этого делать. Сообщу лишь результат: в объеме воды $V_{\text{вод}} = 5 \cdot 10^{-4}$ м^3, сжатом давлением в 1,5 атм, растворено $N_{\text{вод}} = 3{,}30 \cdot 10^{21}$ молекул газа. Всего в бутылке заключено $N = N_{\text{вод}} + N_{\text{г}} = 3{,}30 \cdot 10^{21} + 0{,}15 \cdot 10^{21} = 3{,}45 \cdot 10^{21}$ молекул газа.

Если бы всем этим молекулам – и тем, что над водой, и тем, что в воде, – дать возможность покинуть бутылку и собраться в другом сосуде под давлением в одну атмосферу, они заняли бы объем $V = NkT/P_0 \approx 1{,}34 \cdot 10^{-4}$ м^3.

---

*) Напомним, что 1 атм $\approx 10^5$ Па.

Итак, содержимое бутылки мы обсудили. Теперь откупорим ее. Такую процедуру проделывали почти все и, конечно, все прекрасно помнят, что при этом происходит. В воде появляется множество пузырьков — больших и маленьких, все они активно устремляются вверх, к горлышку, в котором вода как бы пенится. Всплывшие пузырьки лопаются — это отчетливо слышно по характерному шипению, которое издает вода. О происходящем можно сказать и иными словами: освободившись от гнета давления, вода выделяет из себя избыточный газ, который выходит из бутылки.

В процессе выхода газа — это очевидно! — большую роль играет «пузырьковый» механизм. Это означает, что избыточные газовые молекулы, объединяясь, образуют пузырьки, которые всплывают по известным нам законам и выносят газ. «Пузырьковый» механизм — это в отличие от «диффузионного», когда газ выходит из воды вследствие диффузии отдельных молекул к поверхности воды. Подробно этот второй механизм мы обсуждать не станем и не только потому, что он не пузырьковый и не угоден нашей книге, а просто потому, что он очень медленный. Несложным расчетом можно убедиться, что путем диффузии весь газ мог бы выйти из бутылки за время около года. А вот «пузырьковый» механизм мы обсудим подробнее.

На первый взгляд может показаться, что обезгаживание воды этим механизмом должно произойти очень быстро, за время τ_0, необходимое пузырьку, зародившемуся вблизи дна бутылки, чтобы всплыть к ее поверхности. Если радиус пузырька $R \approx 10^{-4}$ м, а толщина слоя воды в бутылке $l \approx 0{,}15$ м, то в согласии с формулой Стокса оказывается, что $\tau_0 \approx l/v \approx 8$ с. Явно время обезгаживания бутылки газированной воды несравненно больше, чем 8 с! За обеденным столом, после того как мы откупорим бутылку, еще долго вода остается газированной и всякий раз, когда мы из бутылки наливаем немного воды в стакан,— появляются новые пузырьки газа.

Для того чтобы понять, почему истинное время, в течение которого вода сохраняет в себе газ, несравненно больше, чем τ_0, сделаем одну очень простую оценку. (Во всех наших рассуждениях мы предполагаем температуру воды неизменной.) Выясним, сколько должно всплыть пузырьков, чтобы весь газ удалился из воды «пузырьковым» механизмом.

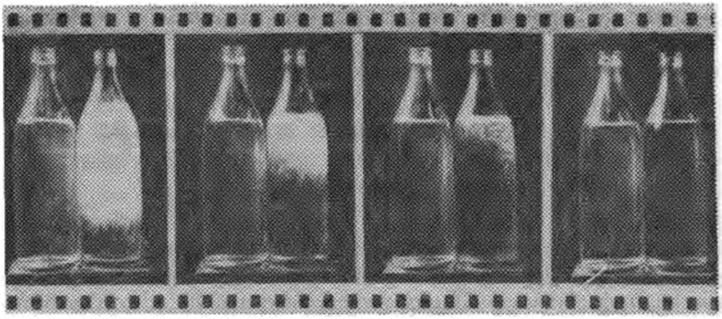
В каждом пузырьке, как мы знаем, заключено $N_г = \frac{(P_0 + 2\alpha/R)(4/3)\pi R^3}{kT}$ молекул газа. При $R \gg \gg 2\alpha/P_0 \approx 1{,}4 \cdot 10^{-6}$ м

$$N_г = \frac{4\pi R^3}{3kT} P_0.$$

А так как в воде растворено $N_{вод}$ молекул газа, то в полной его эвакуации необходимо участие $n_п = \frac{3kTN_{вод}}{4\pi R^3 P_0}$ пузырьков. Пусть $R \approx 10^{-3}$ м. Остальные величины, определяющие $n_п$, нам известны, ранее они встречались. Так вот оказывается, что $n_п \approx 2 \cdot 10^4$. Произнесу результат вслух: для того, чтобы из бутылки удалить весь газ, должно всплыть двадцать тысяч пузырьков! Полученная оценка $n_п$ нами завышена. Во-первых, не весь газ должен собираться в пузырьках, часть должна оставаться растворенной в воде, и во-вторых, могут образовываться пузырьки и побольше наших. Так или иначе, речь идет об огромном количестве пузырьков. Конечно же, ничего подобного в действительности не происходит. Сразу после открывания бутылки за время τ_0 всплывает некоторое количество пузырьков и вода успокаивается, новые пузырьки зримо не появляются или почти не появляются, и, следовательно, не появившись, они и не всплывают. Это означает, что в воде осталась значительная часть растворенного в ней избыточного газа, который теперь может выделяться вследствие диффузии, а это, как мы уже говорили, очень медленный процесс.

Причина того, что много избыточных молекул газа, «затаившихся» в воде, не удаляются из нее пузырьковым механизмом, состоит в том, что вода, после первой порции всплывших в ней пузырей, существенно обезгазилась, из нее удалились те микроскопические пузырьки — зародыши, которые, поглощая избыточные молекулы, превращались в пузырьки покрупнее и всплывали. Оставшемуся в воде газу некуда стекать, поэтому пузырьки не возникают и вода, стремясь избавиться от неугодного газа, может пользоваться услугами лишь диффузионного механизма. Пузырьковый себя исчерпал или почти исчерпал.

Если наша логика непротиворечива, она нам подсказывает совсем простой эксперимент: надо встряхнуть



Взбалтывание бутылки с газированной водой приводит к помутнению воды. Дегазированная вода при взбалтывании остается прозрачной

бутылку с «успокоившейся» газированной водой, создать в ней разрывы и трещинки, которые могут стать зародышами пузырей, и «пузырьковый» механизм должен воспрянуть духом. Мы встряхивали одновременно две бутылки: одну с простой, предварительно обезгаженной водой, а другую с временно успокоившейся газированной. Логика подсказала убедительный эксперимент, соответствующие фотографии бутылок приведены на кинограмме. Впрочем, почти аналогичный опыт проделывают всякий раз, когда за обеденным столом наливают в стакан газированную воду: в бутылке она может быть успокоенной, без пузырьков, а в стакане — с пузырьками. Падая в стакан, вода разрушалась так же, как и при встряхивании.

Вот, пожалуй, и все, о чем я хотел рассказать в этом очерке. Сделаю лишь одну оговорку. Не сочтите все рассказанное основанием для того, чтобы длительно сохранять газированную воду в откупоренной бутылке, надеясь на то, что диффузионный механизм маломощный, а видимых всплывающих пузырьков нет. Могут быть пузырьки и маленькие, невидимые, но в целом уносящие много газа. Так что хранить газированную воду следует все же в закрытой бутылке.

Пузырь-маятник

Что такое маятник мы, пожалуй, представляем себе. И грузик на нитке — маятник, и дощечка, укрепленная на оси, — маятник, и закрепленная пружинка с грузиком — маятник, и наше сердце — тоже маятник...

Так вот, и пузырь в жидкости – маятник. Во всяком случае о многом в его судьбе можно рассказать, имея в виду это определение: пузырь-маятник. Колеблется, разумеется, жидкость, обрамляющая пузырь, но этого мы не видим, а вот периодические изменения формы пузыря-маятника очевидны. Колеблясь, он меняет форму.

Вначале – о том, почему, собственно, пузырь в жидкости может оказаться в положении колеблющегося маятника? Для того чтобы было понятнее, что значит «оказаться в положении маятника», напомню читателю, что происходит с обычным маятником. В данном случае его удобно представить в виде недеформированной, горизонтально расположенной пружинки, оба конца которой закреплены, а посредине расположен грузик массой m.

Когда пружина деформирована и грузик смещен из положения равновесия на величину x, возникает сила, возвращающая его в равновесное положение. Эта возвращающая сила $F = -kx$, где k – характеристика пружины, которая по понятной причине называется коэффициентом жесткости: чем жестче пружина, тем больше величина k. Под влиянием возвращающей силы грузик дойдет до положения равновесия и «по инерции» его проскочит. При этом пружина сожмется, затем под влиянием силы распрямится и все повторится снова. Пружина сожмется и распрямится «на ту же величину» по отношению к положению равновесия, если ее колебания не сопровождаются потерей энергии, не затухают. Именно это далее мы и будем предполагать.

И еще; рассказанное относится к колебаниям, которые совершает пружина после того, как она была выведена из равновесия. Колеблется она сама, мы ее и не подталкиваем, и не тормозим. Говорят: пружина совершает собственные колебания. Именно они и имеются в виду.

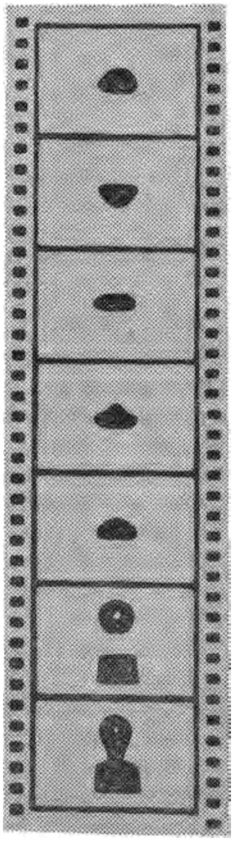
Итак, сила F вынуждала грузик колебаться около положения равновесия с амплитудой x_0. Для дальнейшего очень важно обратить внимание на то, что коэффициент k имеет размерность $[k] = \text{Н/м} = \text{Дж/м}^2$, т. е. размерность, совпадающую с размерностью коэффициента поверхностного натяжения! Это очень важно запомнить!

Запомним это, а пока продолжим разговор о маятнике – грузе на пружине. О колебаниях грузика можно рассказать, следя за его энергией. В крайних точках, где грузик, меняя направление движения, останавливается, его кинетическая энергия равна нулю. Потенциальная энергия упругой деформации при этом максимальна, так как пружина в этих точках оказывается максимально деформированной. А вот в точке, где $x = 0$, пружина не деформирована и вся энергия маятника заключена в кинетической энергии движущегося грузика. За каждый период два раза происходит преобразование кинетической энергии в потенциальную и наоборот.

Теперь, пожалуй, следует оценить период колебаний пружинного маятника τ. Можно было бы, выполнив не очень сложные расчеты, получить точную формулу, определяющую величину τ. Мы поступим поиному, воспользуемся соображениями о размерностях и получим оценку τ. На величину τ пружинного маятника могут оказать влияние лишь две его характеристики – масса m и коэффициент жесткости k. А из них может быть построена единственная комбинация, имеющая размерность времени

$$\tau \sim (m/k)^{1/2}.$$

Наша формула тем более не вызывает сомнения, что, кроме двух названных, у обсуждающегося пружинного маятника, который колеблется без потери энергии, иных характеристик попросту нет!



Последовательные стадии колебания всплывающего пузырька

Вот теперь можно и о пузыре, который оказался в положении маятника. Отвлечемся от того, что всякий пузырь в жидкости всплывает, сочтем, что движение всплывающего пузыря существенно не меняет его «маятниковой» судьбы. А судьба эта может заключаться в следующем. Если сферический пузырек мы слегка сплющим, то при этом увеличим площадь его поверхности и связанную с ней поверхностную энергию. В связи с этим возникает сила, возвращающая форму пузырька к сферической. Пытаясь восстановить сферичность пузырька, она заставит его «проскочить» через истинно сферическую форму и принять вытянутую форму, повернутую на 90° по отношению к ориентации начального сплющенного пузырька. Затем все повторится еще раз, и еще раз, и еще много раз. Пузырь будет колебаться. Пузырек может совершать колебания и иного типа, например, радиальные, периодически изменяя свой объем.

Изменение потенциальной энергии колеблющегося пузыря будет связано с изменением его поверхности и, следовательно, поверхностной энергии, а периодически меняющаяся кинетическая энергия – это энергия движения жидкости, обрамляющей пузырь. В этом процессе роль коэффициента жесткости пузыря-маятника будет играть коэффициент поверхностного натяжения, который, как нам уже известно, имеет ту же размерность, что и коэффициент жесткости пружины: $[\alpha] = \text{Н/м}$. Чем больше величина α, тем труднее деформировать пузырек, увеличивая его поверхность. Поэтому в нашей формуле, определяющей период колебания маятника τ_0, вместо k, видимо, должна фигурировать величина α. А что должно быть вместо массы m? Видимо, масса той жидкости, которая в пузырьке отсутствует, т. е. $m \backsim R^3\rho_ж$ ($\rho_ж$ – плотность жидкости). Приблизительно такая масса воды колеблется вокруг пузыря. Здесь в наших рассуждениях явно слабое место. Почему именно такая, а не иная масса колеблется? Строго говоря, я здесь читателю ничего не доказал. Разве лишь помог ему воспитать в себе интуитивное восприятие правильности предположения, что $m \backsim R^3\rho_ж$. Действительно, так как возмущение жидкости вокруг колеблющегося пузыря простирается примерно на расстояние R, естественно предположить, что интересующая нас масса колеблющегося пузыря должна быть пропорциональна его радиусу R и плотности колеблющейся жидкости $\rho_ж$, в которой он расположен. Из этих двух величин можно составить лишь одну комбинацию, имеющую размерность массы, именно ту, которую мы предположили: $R^3\rho_ж$.

Итак, период колебания пузыря в жидкости должен определяться оценкой

$$\tau_к \sim (\rho_ж R^3/\alpha)^{1/2},$$

следующей из наших не очень строгих рассуждений, в которых в одинаковой степени было место и аналогии, и соображениям о размерностях.

Рассматривая колебания пружинного маятника, мы предполагали, что он колеблется без затухания, т. е. энергия колебаний не рассеивается. Применительно к пузырьку-маятнику это означает, что он колеблется в жидкой среде, вязкость которой равна нулю. Реально, однако, обычные жидкости обладают некоторой, пусть малой, вязкостью, которая должна определить затухание колебаний пузырька-маятника, т. е. уменьшение амплитуды этих колебаний. В действительности же в начале процесса колебаний, например в воде, ее вязкость мало сказывается на периоде колебаний, и в нашей оценке $\tau_к$ величина коэффициента вязкости не должна фигурировать.

Теперь предположим, что жидкость обладает настолько большой вязкостью, что колебания в виде чередующихся последовательных отклонений от сферической формы невозможны, и запасенная в пузырьке энергия рассеется за время $\tau_р$, в течение которого пузырек обретает устойчивую сферическую форму. Величина $\tau_р$, видимо, должна зависеть от коэффициента вязкости η, так как именно вязкость определяет рассеяние энергии, и от отношения α/R, которое имеет смысл давления, вынуждающего пузырек восстанавливать правильную форму. Эти величины определяют время $\tau_р$ лишь в одной комбинации:

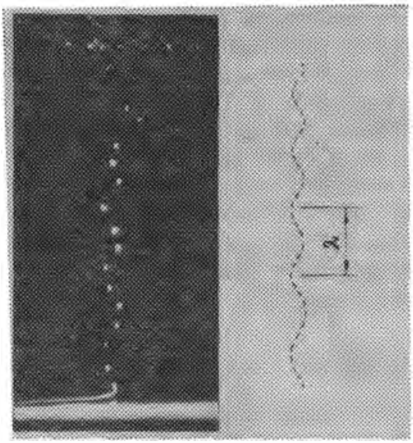
$$\tau_р \sim R\eta/\alpha.$$

Очевидно, рассуждения о пузырьке-маятнике и оценка времени $\tau_к$ будут справедливы лишь при выполнении неравенства $\tau_к \ll \tau_р$, означающего, что прежде, чем, колеблясь в жидкости, пузырек рассеет запасенную в нем избыточную энергию, он должен совершить много циклов колебаний.

В наших рассуждениях мы молчаливо предполагали, что пузырек участвует в одном колебании, имеющем вполне определенную частоту. Действительность может оказаться значительно богаче нашего предположения. Пузырек при надлежащем размере может одновременно участвовать в нескольких и даже во многих колебаниях. Но об этом – в следующем очерке.

А теперь об одном эксперименте, результаты которого могут быть использованы для проверки полученной нами оценки периода колебания пузыря. Хорошо бы проследить за колебаниями пузырька в жидкости в условиях невесомости, когда пузырек не перемещается, а только колеблется. Жаль, у нас с вами нет возможности экспериментировать в невесомости. Мы удовлетворимся худшим вариантом опыта, когда колеблющийся пузырек всплывает в воде. При этом, однако, оказывается, что факт всплывания мы можем обратить на благо эксперимента.

Многие, наверное, наблюдали за тем, как всплывают воздушные пузырьки, которыми «пробулькивают» воду в аквариуме, насыщая ее воздухом. Отчетливо видно, что пузырьки движутся вверх по спирали. А если смотреть на пузырьки через плоское боковое стекло аквариума, то проекция истинной траектории выглядит волнистой линией. Мы не будем пытаться в деталях обсуждать причину такой траектории всплывающего пузырька. Для нас важно лишь, что она определяется периодическими изменениями формы колеблющегося пузырька так, что период колебаний τ, длина волны траектории λ и скорость его всплывания v связаны соотношением $\tau = \lambda / v$.



Колеблющийся пузырек всплывает по винтовой линии

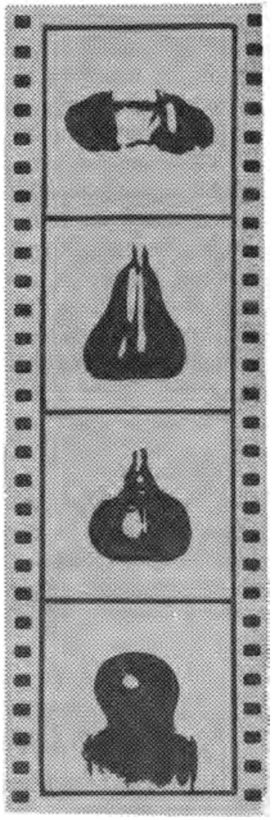
А теперь замысел эксперимента оказывается совершенно естественным. Надо на киноленту заснять процесс всплывания пузырька, определить по кинограмме длину волны видимых колебаний λ, скорость всплывания пузырька v, вычислить по этим данным период колебаний τ, а затем, зная средний радиус пузырька R и плотность жидкости ρ, можно будет по нашей формуле оценить величину α.

Всю эту программу, к сожалению, мы выполнить не сможем. Собственно эксперимент, из которого следуют данные о скорости всплывания, периоде колебаний пузырька-маятника и о длине волны, осуществить несложно. На рисунке приведен кинокадр из отснятого нами фильма. Из этой киноленты могут быть почерпнуты все интересующие нас данные, а вот вычислять α, строго говоря, по нашей формуле нельзя, так как слишком грубы те приближения, которые были сделаны при получении формулы, оценивающей $\tau_к$ и, следовательно, α.

Итак, обсуждая проблему «пузырь-маятник», мы сделали вот что: выяснили основания для того, чтобы пузырь именовать маятником, обсудили аналогию «коэффициент поверхностного натяжения — коэффициент жесткости». Поставили эксперимент, в котором пузырь-маятник себя обнаружил.

Пузырь-бублик

То, о чем я намерен рассказать, удобно сделать именно здесь, сразу же после очерка о пузыре-маятнике. Пузырь-маятник, всплывая, совершает много периодов колебаний, а пузырь-бублик образуется в первом полупериоде: пузырь-сфера исчезает, а пузырь-бублик появляется. Впрочем, по порядку.



Крупный пузырек, продавливая себя, превращается в бублик

В нашей лаборатории ставился такой опыт. Через погруженную в воду коротким концом Г-образную трубку, диаметр которой был равен одному сантиметру, продували воздух. На конце трубки возникал пузырь, отрывался от трубки и всплывал к поверхности воды. При этом, однако, он быстро и сильно деформировался. Подробно рассмотреть происходящее с пузырем невооруженным глазом мы не смогли и поэтому прибегли к помощи кинокамеры. Съемку производили со скоростью около 1000 кадров в секунду, а просматривали отснятую пленку со скоростью 24 кадра в секунду. Растянув происходящее во времени в 40 раз, мы увидели то, что отчетливо иллюстрируется приводимой кинограммой. А происходит вот что: нижняя часть пузыря устремляется к верхней и пузырь, как бы прокалывая себя, превращается в бублик.

В этом процессе важно, что перед отрывом от трубки нижняя поверхность пузыря вытягивается. В связи с этим деформирующее гидростатическое давление немного превосходит $P_{гс} = 2R\rho_ж q$, к которому еще добавляется давление $\Delta P_л = 2\alpha(1/R_н - 1/R_в)$, обусловленное разностью кривизн верхней ($R_в$) и нижней ($R_н$) поверхностей оторвавшегося пузыря. При наблюдаемом в опытах соотношении между $R_н$ и $R_в \approx R$ оказывается, что $P_{гс} > \Delta P_л$, и поэтому именно $P_{гс}$ главным образом определяет деформацию пузыря, завершающуюся его проколом. Он «мягкий» и легко деформируется.

Описанное превращение пузыря в бублик на крупных пузырях наблюдается, а на мелких — нет. Можно оценить граничный радиус пузыря R^*. При $R \gg R^*$ бублик будет формироваться, а при $R \ll R^*$ пузырек будет лишь колебаться, оставаясь при этом пузырьком. Для оценки R^*, видимо, следует деформирующее давление $\gtrsim 2R\rho_ж g$ приравнять лапласовскому $2\alpha/R$. При этом получается следующая оценка R^*:

$$R^* \gtrsim (\alpha/\rho_ж g)^{1/2}.$$

При $\alpha \approx 7 \cdot 10^{-2}$ Дж/м^2, $\rho_ж = 10^3$ кг/м^3 и $g \approx 10$ м/с^2 получим $R^* \approx 2{,}6 \cdot 10^{-3}$ м. А в нашем опыте радиус трубки был $R = 10^{-2}$ м, вот поэтому мы и наблюдали превращение обычного пузыря в пузырь-бублик. Мы ставили опыты и с трубками, радиус которых $R < R^*$. Бублик не получается: пузырек отрывается от трубки и всплывает, колеблясь.

Две судьбы пузырей в воде в невесомости

Фантасты еще в довоенные годы, задолго до космических полетов рассуждавшие на тему о том, что нас ожидает в невесомости в условиях космического полета, обычно поражали воображение предметами и людьми, свободно плавающими в воздухе, и водой, не выливающейся из стакана. Наверное, упоминались и другие диковины, но мне запомнились именно эти: плавающие предметы, люди и невыливающаяся вода. Ее удобно пить, потягивая через соломинку. Действительность оказалась много богаче фантазии. Оказалось, что «безгравитационный» мир от привычного «гравитационного» отличается не эпизодическими диковинами, а как бы иным жизненным укладом. Следствия невесомости обнаруживаются в самых неожиданных явлениях, которые фантасты никак не предвидели.

Оставим фантазии в стороне, обратимся к тому уголку «безгравитационной» действительности, о котором поведали космонавты Б. В. Волынов и В. И. Жолобов, возвратившись из полета на орбитальной космической станции. Среди прочих опытов, они ставили и опыты, цель которых – изучить поведение газовых пузырей в жидкости в условиях невесомости.

Это очень важно – знать, как в условиях невесомости ведут себя пузыри в жидкости. Они возникают, например, в жидком сварном шве при электросварке и не всплывают. Делают шов рыхлым, непрочным. Они, безусловно, обнаружат себя в тех литейных процессах, которые, видимо, вскоре будут осуществляться в космосе. А это значит, что нужно либо уметь препятствовать возникновению газовых пузырей, либо уметь удалять возникшие. Кроме того, надо строить технологический процесс так, чтобы особенности поведения пузырей в невесомости обратить на пользу делу. Эти и подобные проблемы интересовали ученых, когда они планировали опыты с колбой газированной воды в невесомости.

Обсудим опыт Волынова – Жолобова. Сферическая колба, диаметр которой $2L \approx 3$ см, заполнялась водой, затем вода интенсивно встряхивалась. В ней образовывалось множество воздушных пузырьков. Их диаметр был 0,1 – 1 мм. Приготовленная таким образом газированная вода была надолго предоставлена себе самой.

Ее судьбу в земных условиях мы можем предсказать безошибочно: пузыри всплыли бы к поверхности воды, лопнули, отдали бы заключенный в них воздух лабораторной комнате и вода в колбе освободилась бы от пузырей. Процесс недлительный, доли минуты – не больше. Если угодно, можно с той же водой в колбе начинать опыт снова и осуществить его с тем же результатом. А в опыте Волынова – Жолобова все происходило совсем не так. Не подверженные выталкивающей силе пузырьки не всплывали. Примерно через 100 часов в колбе оказалась одна сферическая полость, расположенная в воде почти в центре колбы. Результат опыта можно описать одной фразой: в ансамбле воздушных пузырьков в воде в условиях невесомости происходит процесс их объединения, который завершается формированием одного крупного пузыря. Для нас, жителей «гравитационного» мира, результат по меньшей мере непривычный. Для будущих технологов «безгравитационного» литейного производства – факт первостепенной важности.

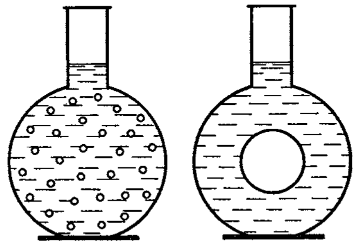
Итак, мы оказались перед необходимостью понять наблюдения космонавтов, понять, как из ансамбля хаотически распределенных в воде газонаполненных пузырьков образуется один большой пузырь. Энергетическую целесообразность объединения пузырей мы подробно обсуждали в очерке, посвященном «мягким» и «твердым» пузырям. Здесь, видимо, все ясно, и нам теперь остается обсудить, как это объединение происходит.

Вначале выясним возможность объединения пузырьков вследствие «поедания» мелких крупными. Да, да – такая возможность существует, и она совсем не свидетельствует о неконтролируемом произволе в мире пузырей. Это станет ясным, если мы вложим физическое содержание в заведомо нефизический термин «поедание». Начнем издалека. Представим себе, что в колбе с водой расположен один пузырек. У него – одинокого! – могут быть две различных судьбы, зависящие и от его размера, и от концентрации газа в воде. Дело в том, что в пузырьке, радиус которого R, газ, как известно, находится под давлением тем большим, чем меньше его радиус. Это означает, что концентрация газа, растворенного в воде вблизи поверхности пузырька, c_R, у маленьких пузырей большая. А вот теперь можно говорить о двух судьбах с полной определенностью, понимая, что поток газа в жидкости всегда направлен в ту сторону, где его концентрация меньше. Если концентрация газа, растворенного в воде вдали от пузырька, $c > c_R$, поток газа будет направлен к пузырьку и его размер будет увеличиваться, а если $c < c_R$, – размер пузырька будет уменьшаться.

Рассказ «о двух судьбах» можно повторить и применительно к ансамблю газовых пузырьков различных размеров. Пусть в данный момент времени средняя концентрация газа, растворенного в воде, равна $\bar{c}$. Так как вблизи каждого из пузырьков концентрация газа тем больше, чем меньше его радиус, естественно предположить, что средняя концентрация газа $\bar{c}$, растворенного в воде, будет тем меньше, чем больше средний размер пузырьков. Это – разумное предположение.

Все пузырьки ансамбля автоматически разделяются на группы с разными судьбами. Те, радиус которых достаточно мал для того, чтобы c_R была большей, чем $\bar{c}$, будут растворяться и исчезать. Те, радиус которых достаточно велик для того, чтобы c_R была меньшей, чем $\bar{c}$, будут поглощать газ и, следовательно, расти за счет газа, который выходит из объема маленьких пузырьков. Об этом можно сказать так: крупные пузырьки «поедают» маленькие. Условие $\bar{c} = c_R$ не определяет равноправной третьей судьбы пузырей в воде, так как те пузыри, вблизи которых в данный момент выполняется условие $c = c_R$, в последующий момент перейдут либо в разряд поедаемых, либо в разряд поедающих.

Итак, маленькие пузырьки «поедаются» большими: маленькие исчезают, большие выживают, а граница между ними определяется размером, при котором имеет место равенство: $c_R = \bar{c}$. Перенос газа между пузырями происходит диффузионно!



В невесомости пузыри в воде со временем объединяются

Изложенные соображения существенны, но недостаточны, чтобы пытаться объяснить результат опыта Волынова — Жолобова. В их опыте оставался один крупный пузырь, а мы пришли к возможности выживания многих так называемых больших пузырей, способных «поедать» так называемые маленькие. Идею о «двух судьбах» и результаты опыта в космосе можно примирить, если учесть, что, так как со временем средний размер пузырьков увеличивается (мелкие поедаются, крупные поедают!), величина $\bar{c}$ должна уменьшаться. При этом окажется, что некоторые пузырьки из разряда «поедающих» переходят в разряд «поедаемых». Такой процесс должен заканчиваться возникновением одного крупного пузыря — победителя. Его-то, возможно, и наблюдали космонавты!

Я предвижу недоумение некоторых читателей, которые в рассказе о двух судьбах не могут усмотреть места невесомости. Речь шла о концентрациях газа, о размере пузырьков и ни разу не упоминалась невесомость! Это недоумение легко развеять. В наших рассуждениях мы молчаливо предполагали, что все пузырьки в воде покоятся, не всплывают. А это может осуществляться лишь в невесомости.

Процесс диффузионного «поедания» малых пузырей большими мы обсуждали как возможный механизм явления, которое наблюдали космонавты. Это действительно реальный механизм, и даже если он действует наряду с другими, конкурирующими, весомый вклад в явление он может внести и рассказать о нем стоило. А конкурирующих с ним механизмов может быть много. Вот, например, один из них. Предположим, что температура воды в центре колбы немного больше, чем вблизи ее поверхности. Это очень реальное предположение! В этом случае под влиянием разности температуры пузырьки будут перемещаться к центру колбы, сталкиваться друг с другом и объединяться. С таким движением пузырьков мы уже встречались в очерке о пузырьках, которые не всплывают, и знаем, что оно реально.

Вычислим разность температуры воды ΔT вблизи стенки и в центре колбы, необходимую для того, чтобы за $t \approx 100$ ч $\approx 3{,}6 \cdot 10^5$ с все пузыри объединились в ее центре. Для этого пузыри должны двигаться к центру колбы со скоростью $v = L/t = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м$/3{,}6 \cdot 10^5$ с $= 4 \cdot 10^{-8}$ м/с. Требующееся для этого значение ΔT можно вычислить, пользуясь формулами, которые содержатся в очерке о невсплывающем пузырьке. Проделайте этот расчет и вы получите величину $\Delta T \approx 10^{-6}$ К. Реально? Реально! Быть может, за это время разность ΔT изменялась и по величине, и по знаку. Во всяком случае, ясно, что объединение газовых пузырьков в режиме их движения и столкновения в опыте космонавтов – процесс реальный. Заметим: в условиях обсуждаемого опыта разность температур может определить объединение пузырей, но не может определить их распад.

Впрочем, главная цель очерка – рассказать о двух судьбах пузыря в воде в невесомости, о диффузионном поедании пузырей. Опыт космонавтов – просто очень удобный повод для этого.

Пузырьковое дыхание воды

Мы будем наблюдать воду, дышащую в аквариуме – модели реки. Вода в нем непроточная, но для наших целей это, пожалуй, даже удобнее. Скажем, не река, а озеро.

Как и в озерной, в воде, заполняющей аквариум, растворен газ; как и в озере, в аквариуме – водоросли. В нем удобно наблюдать за всеми теми процессами, которые обусловлены наличием водорослей и газа, растворенного в воде.

Прежде чем описать и обсудить наблюдения, напомню читателю некоторые сведения, касающиеся растворимости газа в воде. Так как наш аквариум – модель реального озера, мы будем говорить не о газе вообще, а конкретно о воздухе. Так вот, вспомним, что растворимость воздуха в воде зависит от температуры. При низкой температуре она побольше, а при высокой – поменьше. Это обстоятельство имеет множество следствий и многое в жизни озера зависит от того, что с изменением температуры вода своеобразно дышит: днем, когда теплее, из воды

Пузырьковое дыхание воды: вдох и выдох

выделяется растворенный в ней воздух (выдох!), а ночью, с понижением температуры воды воздух растворяется в воде, поглощается ею (вдох!). Это суточное дыхание воды можно наблюдать, следя за поверхностью водорослей, на которых выделяющийся днем из воды воздух может осаждаться в виде пузырьков, – и маленьких, и побольше, и просто крупных – в зависимости от того, где этот пузырек зародится и вырастет. Те, которые зарождаются на открытой поверхности лепестка, вырастают до небольших размеров, отрываются от лепестка и всплывают на поверхность воды. А те, которые зародились на его поверхности где-нибудь вблизи стебелька, могут иметь большой размер и надолго осесть на водоросли. Со временем и они могут оторваться от лепестка водоросли и всплыть.

Мы проделывали с аквариумом опыты, в которых искусственно вынуждали воду дышать. Дышала она не в суточном режиме, а учащенно: в холодильнике ее охлаждали, а затем в комнатных условиях она естественно подогревалась. Отчетливо видно было, что в охлажденной воде, принявшей комнатную температуру, водоросли заселяются газовыми пузырьками.

В режиме дыхания, очевидно, глубина «вдоха» должна определяться шириной температурного интервала ΔT, в пределах которого изменяется температура воды.

Попытаемся вычислить, какое количество молекул Δn «выдохнет» один кубический сантиметр озерной воды, если ее температура возрастет на ΔT градусов. Очевидно,

$$\Delta n = \Delta c/\omega,$$

где Δc — изменение концентрации воздуха, растворенного в воде, а ω — объем, приходящийся на одну молекулу жидкости. Величину Δc удобно переписать в виде $\Delta c(\Delta T/\Delta T)$ — при этом мы никак Δc не изменили. А вот возможность вычислить Δc при данном значении величины ΔT обрели, так как сведения о величине $\Delta c/\Delta T$, т. е. об изменении с температурой концентрации воздуха, растворяющегося в воде, в форме таблиц сообщаются в справочниках. Воспользовавшись этими таблицами, можно убедиться, что

$$\Delta c/\Delta T \approx 3 \cdot 10^{-7}\ \text{К}^{-1}.$$

Вот теперь мы можем записать формулу, определяющую количество молекул газа, «выдыхаемых» кубиком воды:

$$\Delta n \approx \frac{1}{\omega}\frac{\Delta c}{\Delta T} \cdot \Delta T.$$

Для воды $\Delta c/\Delta T$ нам известно,

$$\omega \approx 5 \cdot 10^{-29}\ \text{м}^3.$$

Если мы сочтем, что в течение суток вода в озере меняет температуру на $\Delta T = 5$ K, то окажется, что

$$\Delta n \approx 3 \cdot 10^{22}\ \text{м}^{-3}.$$

Акты «вдоха» и «выдоха» воздуха водой происходят несимметрично. «Вдох», когда вода растворяет в себе газ, заимствуя его из пузырьков, осевших на водорослях, на поверхности затонувших камней, просто плавающих в воде, не сопровождается изменением общего количества газа в водоеме. Разве лишь чуть-чуть увеличивается за счет поглощения воздуха через свободную поверхность озера. Но это изменение пренебрежимо мало, так как при этом воздух в воду проникает путем диффузии, процесса очень медленного. За сутки он может насытить совсем тонкий слой, не более одного сантиметра. А вот при «выдохе», когда подрастают все имеющиеся в воде пузырьки, — они могут всплывать и заключенный в них газ для воды исчезает необратимо. В этом смысле пузырьки в жизни воды играют отрицательную роль, так как они способствуют ее обезгаживанию. Помочь воде и растущим в ней водорослям, и плавающей в ней рыбе, нуждающейся в воздухе, может, например, ветер, который, возмутив поверхность, дает возможность воде захватывать из атмосферы воздух значительно активнее, чем это происходит диффузионным механизмом. Впрочем, не только ветер: все, возмущающее поверхность воды, способствует ее противодействию обезгаживающей роли пузырьков. Падающий в воду камень и даже обычная лодка, скользящая по спокойной поверхности озера, помогают воде дышать.

Текущая вода реки «пузырьково» дышит легче. В ней, бурлящей и волнующейся, могут возникать микроскопические трещинки — зародыши газовых пузырьков, работающих и на вдохе, и на выдохе.

В нашем очерке рассказан лишь кусочек правды о дыхании воды — явлении огромной важности. Лишь тот кусочек, который касается пузырьков. Мы, например, обошли молчанием то обстоятельство, что суточные колебания температуры приводят не к однородному прогреву жидкости, а к установлению в ней перепада температуры, который приводит к движению воды: холодные слои тонут, а те, что потеплее, всплывают. С водой перемещается и растворенный в ней воздух, причем значительно быстрее, чем при механизме диффузии. Но этот процесс мы обсуждать не будем, так как в нем пузырьки не участвуют, а нас интересует пузырьковое дыхание, его возможная роль в таком сложном процессе, как дыхание воды. Удовлетворимся кусочком правды о пузырьковом дыхании.

Часто вспоминаются строки Леонида Мартынова из стихотворения «Вода»:

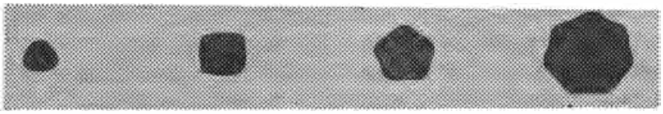
Ей не хватало
Ила, тала
И горечи цветущих лоз.
Ей
Водорослей не хватало
И рыбы, жирной от стрекоз.
Ей
Не хватало быть волнистой,
Ей не хватало течь везде.
Ей жизни не хватало —
Чистой,
Дистиллированной
Воде!

В дистиллированной воде «пузырьковый» механизм выдоха ослаблен, так как в ней мало зарождается пузырьков. А вот, когда вода жива, когда в ней и рыба, и водоросли, тогда есть, где зарождаться и подрастать пузырькам, которые могут всплывать на «выдохе».

И еще две-три фразы о «пузырьковом дыхании» воды. Вы все, конечно, помните, что вода пахнет. Пахнет речной водой, т. е. газом, который выносят на поверхность воды пузырьки на этапе выдоха. Он всяким бывает, этот запах. Но все же часто о нем говорят так: озерная свежесть.

Ограненные пузырьки в воде

Если заглавие очерка читать «в лоб», то, конечно же, очень удивительно: не сферические, не бесформенные, а ограненные пузырьки в воде. Но вот приведенные фотографии свидетельствуют о том, что такие



Ограненные пузырьки в воде

пузырьки действительно существуют, на том, казалось бы, разумном основании, что нельзя сфотографировать то, что не существует. Все, однако, становится не таким удивительным, если уточнить обстоятельства, при которых получены фотографии пузырьков. Фотографировались не свободно плавающие пузырьки, а те, которые образовывались в воде вблизи поверхности быстро колеблющейся металлической трубки. В объеме воды вблизи трубки возникало пульсирующее давление. Оно вынуждало пузырьки колебаться. Колеблясь, пузырьки обретали огранку. Итак – не просто плавающие в воде ограненные пузырьки – это было бы действительно очень удивительно, а пузырьки, огранка которых существует в режиме колебаний. Физики говорят так: в динамическом режиме. Это, если и непонятно по-прежнему, все же менее удивительно. В режиме ускоренного движения очень часто осуществляется то, что в режиме покоя попросту нелепо. Ну, скажем, я могу предъявить мгновенную фотографию шарика, который покоится на внутренней боковой поверхности стеклянного сосуда цилиндрической формы. Шарику полагается быть на дне сосуда, а он – на боковой поверхности. А все дело в том, что «позировавший» шарик жил в «динамическом» режиме, так как сосуд, в котором он находился, вращался вокруг своей оси. Шарик испытывал действие центробежной силы, которая прижимала его к боковой поверхности вращающегося цилиндра. Вот и все! Фотография, где шарик не на дне сосуда, выглядит удивительно, а после разъяснения все, пожалуй, стало на свои места. В действительности все разумно, так как режим – не покоя, а ускоренного движения. Вот нечто подобное происходит и с «ограненными» пузырьками.

Опыты с ограненными пузырьками, существующими в динамическом режиме, были поставлены не вдруг, не только любопытства ради, а для изучения возможного разрушающего действия пузырьков, которые расположены вблизи колеблющихся тел. Подробнее об этом чуть позже, в очерке о кавитации.

Теперь, основываясь на исследованиях М. О. Корнфельда и его сотрудников, расскажу об ограненных пузырьках подробнее. Ученые наблюдали и фотографировали в воде ансамбль пузырьков, радиус которых $R \approx 10^{-4}$ м. Как уже упоминалось, колебания пузырьков возбуждались вибрирующим стержнем. Они вибрировали с амплитудой $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ м и частотой $\approx 7 \cdot 10^{3}$ $с^{-1}$. Вот описание двух основных наблюдений, сделанных экспериментаторами.

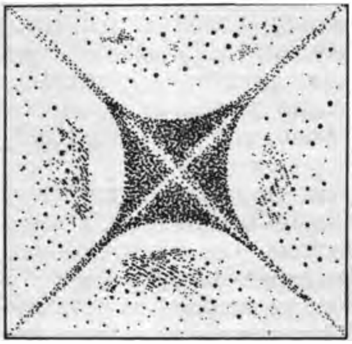
Первое наблюдение: пузырек, достигнув некоторого размера, скачкообразно меняет свою форму – на матовом экране его проекция перестает быть круглой, она превращается в правильный многоугольник с четным числом углов. Эти скачки формы повторяются всякий раз, когда, продолжая укрупняться за счет соседних, данный пузырек (точнее, его проекция) превращается в многоугольник с большим (четным!) числом сторон. Вот числа: пузырек в воде, радиус которого $R \approx \approx 1{,}7 \cdot 10^{-4}$ м, имеет шестистороннюю проекцию на экран, а тот, радиус которого $R \approx 5 \cdot 10^{-4}$ м, имеет четырнадцатистороннюю проекцию.

Второе наблюдение: оказывается, что, если колеблющийся пузырек фотографировать при яркой импульсной вспышке света, длящейся 10^{-6} с,– число граней проекции такого пузырька оказывается вдвое меньшим, чем при фотографировании в обычном режиме, при длительной экспозиции.

Вот теперь, помня о двух описанных наблюдениях, пожалуй, можно пытаться понять рассказанное об огранении пузырьков в воде. Оно возникает в связи с тем, что пульсирующий в жидкости пузырек может участвовать не только в колебаниях «по радиусу», когда он сжимается и растягивается, но и в более сложных колебаниях. При таких колебаниях форма его поверхности не остается сферической, ее проекция на экран может оказаться многоугольником.

Я не стану пытаться объяснять теорию этих колебаний, попробую, однако прибегнуть к аналогии. Это, пожалуй, тоже ценность,– знать об аналогиях и связях в природе. Когда-нибудь наступившее понимание одной из цепочек связей может осветить целый уголок природы. Об этой радости прозрения писали многие. Да и читатель – уверен! – с ней знаком.

Итак – аналогия. Если мембрана из тонкой металлической пластинки, закрепленная в центральной точке или натянутая на рамку, будет выведена из положения равновесия, она начнет колебаться. При этом окажется, что в ней может возбуждаться не одна волна, а одновременно много различных волн. Их сложение (интерференция) приводит к тому, что амплитуды колебаний различных участков мембраны оказываются различными и разделены они покоящимися, так называемыми «узловыми линиями», которые возникают в результате взаимного «гашения» возбужденных волн и волн, отраженных от контура мембраны. Их легко увидеть. Если на мембрану насыпать слой мелкого сухого песка, а затем возбудить в ней колебания, то с колеблющихся участков песок как в желобки будет ссыпаться к узловым линиям. При этом образуются симметричные фигуры, зависящие и от формы мембраны, и от того, как она закреплена. Они называются «фигуры Хладни» и их нетрудно получить и в школьной лаборатории, и в домашних условиях. Так вот, подобные сложные колебания, наблюдаемые в плоской мембране, возникают и в пузырьке и обнаруживаются они по огранению пузырька.



Фигура Хладни

Наблюдаемая форма колеблющегося пузырька зависит от длительности фотоэкспозиции

И наконец, о том, почему, меняя условия фотографирования, мы можем изменить число граней фигуры, фиксируемых фотоаппаратом. Помните: если фотографировать при свете обычной лампы — получается $2n$-угольник, а при импульсном освещении — n-угольник. Вот это объясняется легко. Истинная форма пузырька обнаруживается при вспышке света, длительность которой существенно меньше периода колебаний пузырька. Если же мы будем фотографировать колеблющийся пузырек при экспозиции, длительность которой существенно превосходит период колебаний, на пленке будут зафиксированы предельные формы пузырька, а это означает, что на фотографии число граней удвоится. Это отчетливо иллюстрирует рисунок.

Кипение жидкости

Природа вещей такова, что жидкость, нагретая до определенной температуры, должна кипеть. Этого требуют законы природы, это доподлинно известно всем, и учащим, и учащимся, и не имеющим отношения к наукам. Для воды в обычных условиях эта температура равна 100 °С. Точнее говоря, температурная шкала Цельсия так построена, что температура кипения главной жидкости на планете при нормальном атмосферном давлении определяется удобным и круглым числом 100. Казалось бы, ясность исчерпывающая: воду надо нагреть до $T = 100$ °С, поддерживать ее при этой температуре и она, подчиняясь законам природы, будет кипеть до тех пор, пока вся не превратится в пар. Кажется, все ясно!

Мы нисколько не собираемся порочить законы природы, однако хотели бы внимание читателя обратить на то, что в действительности кипение жидкости, в частности воды, значительно более сложно, чем та прямолинейная схема, с описания которой очерк начат.

В природе часто наблюдаются такие ситуации, когда как-будто все требования ее законов соблюдены, а явление — прямое следствие этих законов — не обнаруживается. Скажем, охладим воду до температуры чуть ниже $T = 0$ °С, а она не кристаллизуется или нагреем ее чуть выше $T = 100$ °С, а она не кипит... Это совсем не значит, что законы нарушаются. Применительно к воде это значит иное: готовность воды вскипеть встречает трудность при $T = 100$ °С, состоящую в том, что ей... некуда вскипеть. Я не оговорился, именно так: некуда вскипеть! Процесс испарения, т. е. отрыв атомов или молекул от поверхности жидкого или твердого тела и их переход в паровую фазу такой трудности не встречает, так как всегда есть поверхность, ограничивающая тело, и с этой поверхности может происходить испарение. Чем больше поверхность, тем больше атомов сможет испариться. Если испаряется сферическая жидкая капля, радиус которой R, то, при прочих равных условиях, поток испарения $\sim R^2$. А процесс кипения предполагает образование паровой фазы в объеме жидкости. Но объем жидкости, как мы знаем, занят жидкостью, и для паровой фазы вроде бы и нет места. Именно это и имелось в виду, когда мы утверждали, что жидкости некуда вскипеть. Складывается впечатление, что, предъявив жидкостям требование кипеть, природа не позаботилась о возможности выполнить это требование. Скажем так: вода охотно вскипела бы при $T = 100$ °С, но обстоятельства, в которых она находится, не дают ей возможности сделать это.

Вспомним здесь о пузырьке в воде. Допустим вначале, что он имеется. Наличие пузырька в объеме жидкости дает ей возможность испаряться с поверхности пузырька в его объем. Сразу же возникают возражения: один пузырек погоды не делает, да и тот, прихватив с собой какое-то количество пара, всплывет и исчезнет. Впрочем, сколько бы их ни было — все всплывут и все исчезнут, и очень скоро вода опять окажется стесненной уже упомянутыми обстоятельствами.

В этом возражении мы разберемся позже и отклоним его. А сейчас поговорим о судьбе одного пузырька в нагреваемой воде, температура которой приближается к температуре кипения.

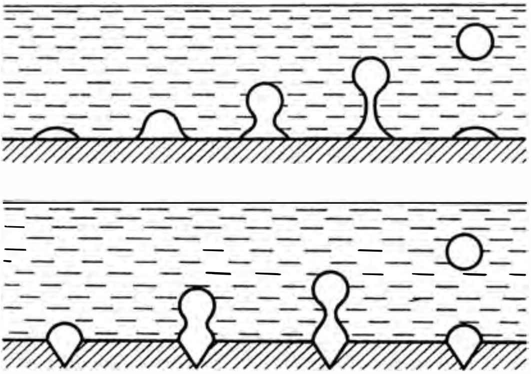
Пузырек, заполненный паром жидкости, одновременно подвержен действию трех давлений: его сжимают лапласовское давление $P_л$, внешнее атмосферное P_0 и растягивает давление заключенного в нем пара $P_п$. Строго говоря, имеется еще сжимающее гидростатическое давление P_g и давление постороннего газа $P_г$, который мог бы оказаться в пузырьке. В случае маленьких пузырьков, расположенных на некоторой небольшой глубине $h \ll h^*$, значение $P_g \ll P_л$. Действительно, из условия $P_g = \rho g h^* = 2\alpha/R$ следует оценка $h^* = 2\alpha/\rho g R$. Применительно к воде при $R \approx 10^{-6}$ м оказывается, что $h^* \approx 15$ м. Величиной $P_г$ можно пренебречь, учитывая, что при температуре кипения $P_п$ велико, равно атмосферному давлению. Мы будем полагать, что $P_г \ll P_п$. Давление P_0 не зависит от температуры воды, давление $P_л = 2\alpha/R$ с ростом температуры немного падает, так как падает α и растет R, а давление пара $P_п$ с ростом температуры быстро увеличивается. Для того чтобы пузырек мог расти, поглощая пар, давление пара должно превзойти сумму лапласовского и атмосферного давлений. Пока этого не произошло, пузырек будет сжиматься, «схлопываться». Имеющийся в нем пар сконденсируется в капельку, и пузырек исчезнет (если в нем нет газа). А вот когда давление пара превзойдет сумму $P_л$ и P_0, начинается кипение. При какой температуре это произойдет? Произошло бы при $T = 100\,°C$, если бы можно было пренебречь лапласовским давлением, которое характеризует не собственно жидкость, а характеризует расположенный в ней пузырек. А как все же быть с лапласовским давлением, сжимающим пузырек? Воде следует преодолеть и его, немного перегреться над $T = 100\,°C$ и увеличить давление пара на значение, равное этому давлению. Очевидно, что чем меньше радиус пузырька, тем больший потребуется перегрев. Итак, за возможность вскипеть вода должна заплатить перегревом. Оценим значение минимального перегрева, необходимого для того, чтобы закипела жидкость, в которой максимальный зародышевый пузырек имеет радиус R. Можно показать, что значение относительного минимального перегрева жидкости с пузырьком с изменением его радиуса изменяется по закону $\Delta T/T_к \sim R^{-1}$, где $T_к$ – температура кипения. Расчет показывает, что если $R = 10^{-5}$ м, то $\Delta T = 37{,}3$ К, а если $R \approx 10^{-4}$ м, то $\Delta T = 3{,}73$ К. В обычной, специально не обработанной воде, в ее объеме или на границе со стенками посуды, такие пузырьки найдутся.

Возвратимся теперь к тем сомнениям, которые было обещано обсудить чуть позже. Это время уже наступило. Действительно, данный, как и любой иной пузырек, всплывет на поверхность воды, лопнет, выбросит запасенный в нем пар и выйдет из игры, прекратит свою службу в качестве помощника кипению. Для того чтобы «пузырьковое кипение» могло осуществляться все время, должны возникать новые пузырьки взамен вышедших из игры. В воде или на поверхности сосуда, в котором она кипит, должен действовать источник пузырей.

Обсудим один из возможных процессов воспроизводства пузырьков, необходимых для кипения. Один из возможных, могут быть и иные! Этот процесс легко представить себе, если учесть, что пузырьки могут зарождаться не в объеме воды, а на границе между водой и тем сосудом, в который она налита. На поверхности сосуда всегда найдется микроскопическая трещина или царапина, в которой сохранилось немного воздуха. Он-то и станет зародышем газового пузырька, необходимого для кипения. (Впрочем, пузырек может сохраниться и на гладкой поверхности сосуда.) Если зародыш очень мал, может потребоваться значительный перегрев воды для того, чтобы он сослужил службу кипению. Но это – количественная сторона дела, а не принципиальная.

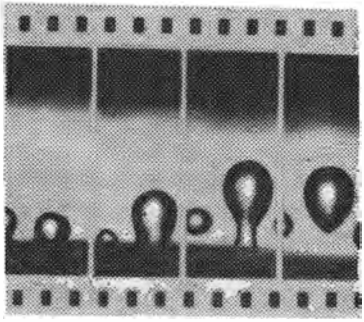
Когда пузырек, выросший на этом зародыше-трещинке, оторвется и всплывет, на гладкой поверхности или в трещинке все же останется немного газа и все повторяется сызнова. Последовательность стадий этого процесса изображена на рисунке, а кинетика формирования одного пузырька – на приводимой кинограмме.

Как долго может происходить процесс воспроизводства пузырьков, обслуживающих кипение? Принципиальных ограничений нет. Либо, пока вся вода в сосуде не выкипит, либо когда случайно данный источник пузырей заглохнет.



В кипящей жидкости пузырьки зарождаются в одних и тех же «активных» точках на поверхности сосуда, в котором находится жидкость

Если действительно процесс воспроизводства пузырьков существенно определяет процесс кипения, то можно предсказать явление «локального» кипения, когда реально действуют один – два очага воспроизводства пузырей и вблизи этих очагов кипение и происходит. А во всем остальном объеме – небурлящая, перегретая жидкость. «Локальное» кипение очень легко наблюдать экспериментально. Для этого на дно стеклянного химического сосуда надо положить «очаг пузырей» – осколок стекла или кусочек исцарапанной проволоки, заполнить сосуд водой и нагревать до кипения. Мы это проделывали множество раз, снимали и фото-, и киноаппаратами.



Последовательные стадии формирования газового пузырька при вскипании

Естественно возникает вопрос: а что если в жидкости нет зародышевых пузырьков и если их образование исключено? Допустим это. Значит ли, что при таких условиях жидкость можно перегревать бесконечно и она никогда не вскипит, не превратится в пар? Не значит! Превратится в пар! Для этого, после значительного перегрева, она должна будет... взорваться. Вот описание красивого опыта, иллюстрирующего взрыв перегретой жидкости, которая не может вскипеть пузырьковым механизмом. Пусть в вертикальном столбе одной жидкости всплывает капелька другой, изучаемой жидкости с более низкой температурой кипения. Если в столбе жидкости поддерживать разность температуры так, чтобы верхние слои были более горячими, то, всплывая, капелька будет нагреваться. Твердых стенок сосуда она не касается, и зародышевые пузырьки, обычно формирующиеся на стенках, в объеме капельки образовываться не будут. Достигнув некоторого уровня перегрева, капелька взорвется. Оказывается, что в таких условиях перегрев ΔT может оказаться очень значительным $\sim 10^2$ К.

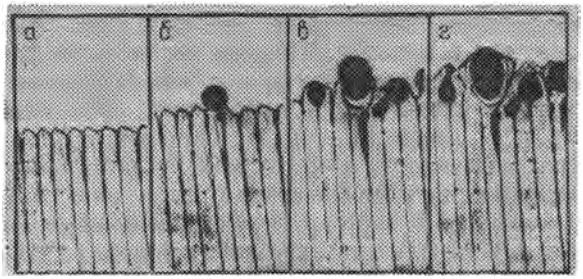
В очень интересной статье о нестабильных жидкостях (Наука и жизнь, 1979, №2) Г. Спирин вспоминает о том, что в томах старинного курса общей физики О. Д. Хвольсона, по которым некогда учились многие поколения и нефизиков, и физиков (в том числе и великий Энрико Ферми) и которые отжили свой век, описан простой опыт по перегреву воды. На горячей сковородке смесь льняного и гвоздичного масел, а в ней – капелька воды. Эту смесь перегревали до 178 °С! Видимо опыт можно осуществить и не прибегая к такой экзотической смеси масел, а воспользовавшись просто льняным или подсолнечным маслом. В школьной лаборатории найдется термопара, и читатель сможет такой опыт поставить.

И наконец последнее замечание. Оно носит характер очень общий. Во многих случаях, даже самых простых, законы природы часто вуалируются иными явлениями, не случайными, а с необходимостью сопутствующими основному. Рассказанное о кипении воды и о пузырях, без которых оно невозможно, – яркий тому пример.

«Вскипание» кристаллизующейся жидкости

Курьезность названия очерка не уводит нас далеко от существа процесса, которому очерк посвящен. Разумеется, истинное кипение жидкости происходит при температуре кипения, а не кристаллизации, но характерный внешний признак кипения — появление, рост и слияние газозаполненных пузырьков — имеет место и в том процессе, которому посвящен очерк.

Собственно рассказу о вскипании кристаллизующейся жидкости необходимо предпослать напоминание о широко известном факте: часто в жидкости растворяется больше газа, чем в кристалле из того же вещества. Во всяком случае, у многих веществ дело обстоит именно так. Чтобы освободить и себя, и читателя от забот об излишних подробностях, для определенности будем говорить не о газе, а о воздухе, не о жидкости вообще, а о воде. К воздуху и воде упомянутое отличие в растворимостях относится. Вот теперь все последующее, надеюсь, читатель будет воспринимать легко, а мне легко будет рассказывать.



Этапы «вскипания» жидкости перед фронтом кристаллизации

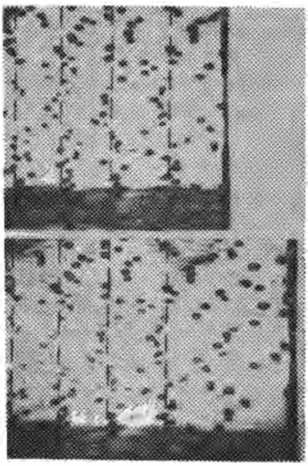
Представим себе процесс кристаллизации воды, в которой растворен воздух. Граница между льдом и кристаллизующейся водой движется в сторону воды. Так как во льде растворяется воздуха меньше, чем в воде, — перед движущейся границей воздух должен накапливаться. Чем больший путь пройдет граница, тем больше воздуха накопится перед ней. Когда концентрация воздуха достигнет некоторой предельной, перед движущейся границей начнут зарождаться и расти газовые пузыри. Не станем здесь обсуждать вопрос о том, какая концентрация оказывается предельной. Эта величина очень зависит и от условий кристаллизации, и от чистоты воды, и от способа зарождения пузырька, и от многих других плохо контролируемых обстоятельств. Удовлетворимся здесь знанием того, что такая концентрация существует. Процесс газовыделения в пузырьки происходит активно и внешне создает иллюзию кипения жидкости на границе между жидкостью и льдом. Разумеется, только иллюзию. То, о чем здесь рассказано, дает основание произнести крайне курьезную фразу: замерзающая жидкость кипит. Оговорки, подобающие в этом месте, ранее уже были сделаны в начале очерка.

Возникшие перед фронтом кристаллизации пузырьки будут захватываться льдом, становясь его дефектами. Газовые пузырьки в истинно кипящей воде имеют совсем иную судьбу. Как мы знаем, они всплывают к поверхности воды и выбрасывают из себя пар в окружающую паровую фазу. Они как бы поглощаются не твердой, а паровой фазой. Проблема захвата пузырей достойна отдельного рассказа, а здесь обращу внимание лишь на сам факт: захватываются!

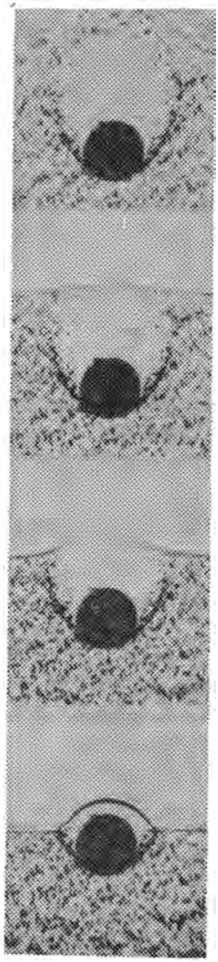
Продолжая логику рассказа, легко предсказать существование двух интересных явлений, наблюдавшихся в лабораторных опытах. Первое из них состоит в следующем. Образование пузырьков, как мы знаем, может наблюдаться лишь после того, как вблизи границы лед – вода со стороны воды концентрация газа достигнет некоторой предельной. Когда жидкость «вскипает» и накопившийся газ поглотится пузырьками, а пузырьки поглотятся льдом, концентрация растворенного газа резко упадет и зарождение новых пузырьков прекратится. Для того чтобы этот процесс начинался снова, движущийся фронт должен пройти некоторое расстояние, «подметая» накопившийся перед ним газ до тех пор, пока концентрация газа опять не достигнет предельной. После этого все повторится сызнова: родятся пузырьки, поглотятся льдом и концентрация газа перед фронтом резко упадет. И все опять начнется сызнова. А это означает, что «вскипание» будет происходить периодически и во льду газовые включения должны расположиться слоями. Именно так и происходит. Во всяком случае в тех тонких лабораторных препаратах, с помощью которых в нашей лаборатории снимался кинофильм «Периодический захват газовых включений льдом».

В массивных слоях речного или морского льда эта периодичность, конечно, теряется из-за температурных неоднородностей и из-за того, что вода перемешивается, разгоняя накопившийся перед фронтом газ. Но, будучи привилегией лишь специально созданных тонких препаратов, где можно строго соблюсти требующиеся условия кристаллизации, при которых жидкость неподвижна и требующееся распределение температуры строго поддерживается, – эффект периодического захвата пузырей не перестает быть интересным, так как он оказывается источником сведений о процессах, которые происходят перед движущимся фронтом кристаллизации газонасыщенных жидкостей.

Теперь о втором явлении, которое можно назвать так: «пузырьковая тень». Оно обнаруживается, если перед движущимся фронтом кристаллизации расположена крупинка постороннего вещества, например, камешек или металлическая крупинка. Такая крупинка, разумеется, не может прекратить процесс кристаллизации, ей под силу лишь немного исказить форму движущегося фронта, который, продви-



Периодический захват газовых пузырьков движущимся фронтом кристаллизации (последовательные стадии)



Последовательные стадии формирования «тени» движущимся фронтом кристаллизации газонасыщенной воды нувшись на некоторое расстояние, восстановит свою форму и о крупинке забудет. Она, однако, может играть и другую роль, влияя на распределение пузырьков, появляющихся при кристаллизации жидкости, насыщенной газом. Дело в том, что тело крупинки задерживает газ, накопившийся перед движущимся фронтом кристаллизации. За крупинкой накопление газа начинается сначала. Это означает, что фронт должен пройти некоторое расстояние, прежде чем перед ним накопится количество газа, достаточное для зарождения пузырьков. Это расстояние и определяет размер «пузырьковой тени», т. е. области кристалла, свободной от газовых пузырьков.

Очень отчетливо «пузырьковая тень» иллюстрируется приводимой кинограммой. Она смонтирована из кадров фильма, снимавшегося в опыте по кристаллизации газонасыщенной воды, в которой были размещены маленькие медные шарики.

Я хочу, чтобы из этого очерка читатель почерпнул следующие сведения: кристаллизация газонасыщенной жидкости может сопровождаться появлением газовых пузырьков перед движущимся фронтом кристаллизации, этот процесс может носить и периодический характер, и, при наличии макроскопических включений, может сопровождаться появлением «пузырьковой тени».

Пузырьковая камера

В физических лабораториях она появилась не так давно, о ее рождении американский физик Дональд Глезер сообщил в 1952 г. в апрельском выпуске научного журнала «Physical Review».

В тех лабораториях, где для обнаружения и исследования элементарных частиц десятки лет пользовались камерой Вильсона, в послевоенные годы стали появляться задачи, непосильные для нее. Она, восторженно именуемая «высшим кассационным судом в физике», не могла зарегистрировать частицы, обладающие очень высокими энергиями, поскольку такие частицы в газовой среде пролетают значительное расстояние, не вступив во взаимодействие ни с ядрами, ни с электронной оболочкой атомов газа. Если это расстояние сравнимо с размером камеры Вильсона, а тем более, если существенно превосходит его, частицы проходят сквозь камеру, ничего не сообщив о себе. Для регистрации таких частиц нужна камера, объем которой заполнен веществом более плотным, чем газ, даже если он сжат значительным давлением.

Легко следовать логике, когда уже известны пройденные, точнее – преодоленные трудности на пути к открытию. Эта легкость – привилегия рассказчика, глядящего на старт с финиша. Кроме того, у него есть право на некоторые домыслы, касающиеся деталей пути. Воспользуемся этим правом, но будем помнить, что первооткрыватели идут путями резко индивидуальными и на поворотах руководствуются иногда не логикой, а интуицией, иной раз сворачивая в сторону без особого обоснования.

Мысль Глезера, решившего создать замену камере Вильсона, вначале, видимо, развивалась, следуя законам формальной логики. Если в объеме камеры должен находиться не газ, то, следовательно, либо твердое тело, либо жидкость. Твердое тело, вообще говоря, может оказаться вполне эффективным детектором частиц высоких энергий. Глезер, разумеется, знал о том, что толстослойные фотоэмульсии успешно применяются для регистрации быстрых частиц, приходящих из космоса. Но эти эмульсии, как, впрочем, и другие твердые тела, обладают существенным недостатком, который заключается в слишком стойкой памяти: след, созданный быстрой частицей в твердом теле, существует долго в связи с тем, что атомы твердого тела в области трека перемещаются медленно, и много времени должно пройти, прежде чем изгладится дефектная область, созданная энергичной частицей.

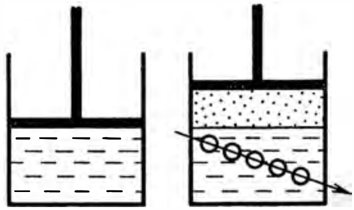
Глезер стремился к созданию прибора, который надежно регистрировал бы частицы и быстро «забывал» о них, становясь готовым к регистрации новых частиц. Мысль обратилась к жидкости. Формальная логика уступила место соображениям по аналогии, точнее – по «антианалогии». С такой возможностью мы уже встречались, обсуждая мыльные «антипузыри». В камере Вильсона газовая среда в момент регистрации частицы рождает жидкие капли, располагающиеся вдоль ее траектории. Быть может, ситуацию следует «обратить» и заставить жидкую среду рождать газовые «капли»? В этом случае проблема будет решена, так как удовлетворятся главные требования, предъявляемые к камере: жидкая среда активно тормозит быстрые частицы и способна скоро заполнять возникшие вдоль траектории газовые пузырьки, уничтожая их, готовя камеру к приему и регистрации новых частиц. Дело как будто бы за малым: заставить жидкость рождать газовые пузырьки именно в момент, когда летит частица, и именно вдоль ее траектории. Способ рассуждать по аналогии и здесь смог оказать услугу. Газовая среда рождает жидкие «капли» в тот момент, когда она становится пересыщенной и когда есть активные центры – ионы, на которых происходит конденсация избыточной влаги. Естественно предположить, что жидкость будет рождать пузырьки вдоль траектории частицы в перегретой жидкости, где возникают причины, способствующие развитию этих пузырьков вследствие вскипания перегретой жидкости. Не во всем объеме, а вскипания локального, в локализованных участках вдоль траектории летящей частицы.

Далее логика Глезера, видимо, развивалась следующим образом. Если в цилиндре поршнем сжать жидкость, то ее можно нагреть до температуры, превосходящей температуру кипения при атмосферном давлении. Если затем давление внезапно понизить, жидкость окажется перегретой и какое-то время будет находиться в неравновесном (говорят: метастабильном) состоянии. Если в это время сквозь жидкость пролетит ионизирующая частица – она вызовет вскипание вдоль своей траектории, формирование цепочки пузырьков пара.

Чтобы проверить этот ход мыслей, Глезер поставил великолепный эксперимент и обнаружил явление, которое следует именовать «эффектом Глезера». Стеклянную колбу он заполнил диэтиловым эфиром, который без особых предосторожностей легко можно перегреть более чем на 100 °С. Точка кипения диэтилового эфира 34,6 °С, а в колбе, с которой экспериментировал Глезер, он был нагрет до 140 °С, оставаясь спокойным. Стоило, однако, поднести к стеклу колбы препарат, излучающий γ-кванты, жидкий диэтиловый эфир мгновенно и бурно вскипал.

Эффект Глезера изучался и экспериментаторами, и теоретиками. Первый «электрический» вариант теории развил сам Глезер. Он предположил, что вдоль траектории летящей частицы образуется «линейное облако» одноименно заряженных ионов. Отталкиваясь друг от друга, они вызывают микроразрывы жидкости. Возникающие таким образом трещинки оказываются в роли зародышевых. Подрастая в перегретой жидкости, они превращаются в пузырьки вдоль траектории летящей частицы.

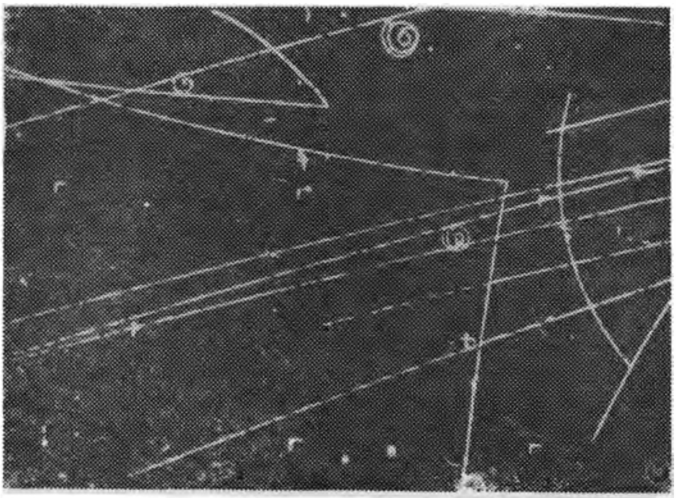
Есть и иной, «тепловой» вариант теории. Согласно этой теории при прохождении заряженной частицы через жидкость, заполняющую камеру, образуются электроны. Они теряют свою энергию на некотором малом отрезке пути. Выделяющееся при этом тепло расходуется на испарение молекул жидкости в объем зародышевых пузырьков.



Так обнаруживается след ионизирующей частицы в пузырьковой камере Глезера

Наличие двух теорий, видимо, означает, что каждая из них в лучшем случае описывает лишь одну сторону сложного явления и что проблема еще будет привлекать к себе внимание физиков. В данном случае для нас важен факт: быстрая, энергичная частица или γ-квант, взаимодействуя с жидкостью, готовой вскипеть, создает активные точки, в которых вскипание происходит в первую очередь.

Итак, все элементы будущей камеры налицо: снятие давления с перегретой сжатой жидкости способствует ее вскипанию, а пролетающая в жидкости ионизирующая



Сфотографированные в пузырьковой камере треки заряженных частиц

частица делает это вскипание более легким вдоль траектории полета, которая оказывается отмеченной ниточкой «отрицательной росы». Все дальнейшее – дело техники.

Несколько фраз о технике пузырьковых камер. В зависимости от решаемой задачи сейчас используются многие различные жидкости, заполняющие камеры: и эфир, и пентан, и водород, и другие. Рабочий объем камер изменяется в широком диапазоне. С годами растет потребность во все более и более крупных камерах. Недавно в СССР построена пузырьковая камера-гигант, названная «Людмила». Объем этой камеры 40 $м^3$.

Я не уверен в том, что мысль Глезера развивалась именно так, как представлено в очерке. Важен результат: он сумел предложить идею прибора, с помощью которого решаются сложнейшие задачи физики элементарных частиц.

В 1960 г. Глезеру была вручена Нобелевская премия. Это произошло через 33 года после того, как лауреатом этой почетной премии стал его предшественник Вильсон.

Газовый пузырек и прочность жидкости

Газовый пузырек в жидкости, даже маленький, даже невидимый глазом, даже прячущийся от сильного микроскопа, способен значительно уменьшить ее прочность. Об этой способности пузырьков мы и поговорим.

Словосочетание «прочность жидкости» настораживает. Мы привыкли к тому, что под влиянием внешних усилий жидкость течет, а не разрушается. Какая уж тут прочность? Однако дело обстоит действительно так лишь в том случае, когда приложенные напряжения вызывают взаимный сдвиг соседних слоев жидкости. Этот сдвиг, собственно, и есть ее течение. Сдвигу жидкость сопротивляется лишь в меру своей вязкости. Упругости, той самой, благодаря которой форма тела восстанавливается, когда на него перестают действовать силы, жидкости при этом не обнаруживают: жидкость занимает форму сосуда, в который налита. Сила тяжести вызывает сдвиговые напряжения в жидкости, и она «растекается» в сосуде. Такими напряжениями разрушить жидкость нельзя, ее можно лишь заставить течь. А вот напряжения, которыми, к примеру, всесторонне растягивается капля, могут превзойти прочность жидкости и разрушить каплю. Все, о чем будет речь далее, относится к этой так называемой объемной прочности жидкости: иной у нее просто нет!

Впервые прочность жидкости еще в 1850 г. измерил французский физик Бертло. Он придумал остроумный и простой метод измерения. Очень простой! Рассказать о нем надо, как впрочем надо обратить внимание на таящийся в нем источник экспериментальной ошибки. Источники экспериментальных ошибок иногда до поры до времени таятся и объявляются именно тогда, когда кажется, что опыт надежно и успешно завершен.

Стеклянный капилляр заполняется жидкостью, а затем с двух концов запаивается. При этом, как правило, в капилляре остается пузырек воздуха. Воздух можно растворить, нагревая капилляр с жидкостью. При некоторой температуре T_0 пузырек исчезнет. При охлаждении капилляра появится напряжение, растягивающее жидкость, так как она сжимается в большей мере, чем стеклянный капилляр и при температуре T эти напряжения (растягивающие, а не сдвигающие!) ее порвут. Раздастся резкий звук и появится газовый пузырек. Прочность жидкости σ можно вычислить, зная T_0 и T, разность коэффициентов объемного расширения жидкости и стекла $\Delta\gamma$ и модуль объемной упругости жидкости E.

Замысел метода красивый, однако, пузырек может появиться и не вследствие разрыва жидкости, а, например, вследствие ее отрыва от поверхности капилляра. В этом случае определится не прочность жидкости, а прочность ее сцепления со стеклом (затаившийся источник экспериментальной ошибки!). Опасность очень реальная! От нее свободен другой метод, так называемый центробежный. Метод тоже не сложен: открытый с двух сторон капилляр, заполненный жидкостью, подвергается быстрому вращению и при некотором значении угловой скорости вращения Ω^* в середине капилляра жидкость разорвется. Ее прочность можно вычислить, зная Ω^* и длину столбика жидкости капилляра.

Итак, прочность жидкости определить можно, во всяком случае, можно поставить разумно задуманные опыты по ее определению. А вот результаты этих опытов оказываются очень различными. Разные авторы сообщают самые различные данные о прочности воды, определенной центробежным способом: 49 Н/см^2; 56 Н/см^2; 2800 Н/см^2; 32 500 Н/см^2!!! Какому числу верить? Все числа получены надежным методом, все экспериментаторы добросовестны. Из общих соображений ясно, что, когда речь идет о прочности, верить надо большему числу, так как в силу какой-то случайной причины прочность может лишь понизиться, но никак не может случайно возрасти. Но естественно возникает сомнение, является ли «большая» прочность истинной? Быть может, истинная много больше «большей»?

Здесь мы подошли к цели очерка, к тому, чтобы рассказать о влиянии газовых пузырьков на прочность жидкости. Сделаем предположение: истинная прочность жидкости, та самая, которая определяется взаимодействием между молекулами, может быть значительно понижена, если в жидкости окажется хотя бы один газовый пузырек. Под влиянием растягивающих напряжений он может разрастаться, а это и приведет к разрыву жидкости. Так же обстоит дело, когда речь идет о прочности твердых тел: маленькая трещинка в теле резко понижает его прочность. Газовый пузырек – слабое место в структуре жидкости, именно он и определяет ее прочность, точно так же, как слабое звено-колечко определяет прочность цепи.

Прежде чем сделанное предположение мы положим в основу дальнейших рассуждений, попробуем убедиться в том, что оно не лишено смысла. Если предположение разумно, если действительно газовые пузырьки резко понижают прочность воды, то тщательно обезгаженная жидкость должна обнаружить прочность большую, чем жидкость газированная. Дело именно так и обстоит, и наше предположение достойно того, чтобы его серьезно обсуждать.

Итак, возникает вопрос, почему уменьшается прочность жидкости, когда в ней есть газовые пузырьки. Предположение, что пузырьки уменьшают площадь «живого сечения» разрываемого образца, явно несостоятельно. Заведомо незначительным может быть уменьшение площади по этой причине в прозрачной жидкости. Дело явно в чем-то ином, в чем пузырьки все же играют решающую роль.

Существует теория прочности жидкости, содержащей газовые пузырьки. Еще в 40-е годы ее построил выдающийся физик-теоретик академик Я. Б. Зельдович. Не излагая эту теорию, я лишь опишу ее основные следствия, против которых наша физическая интуиция, видимо, не будет возражать.

Главная физическая идея, лежащая в основе теории, состоит в том, что разрушение жидкости наступает вследствие развития газовых пузырьков под влиянием напряжений σ, растягивающих жидкость. Увеличиваясь, пузырьки как бы расчленяют жидкость. До некоторого напряжения деформируемый пузырек в жидкости под влиянием лапласовского давления стремится восстановить свой размер и, таким образом, сопротивляется действию напряжений, растягивающих жидкость. При некоторой величине напряжений σ^* пузырьки теряют устойчивость, т. е. способность сопротивляться растягивающим напряжениям и, увеличиваясь, расчленяют жидкость. Ее прочность и определяется величиной σ^*. Подобная ситуация складывается и при разрушении кристаллических тел, в которых имеются трещинки. При некоторой величине приложенных напряжений трещинки начинают разрастаться. Ситуация подобна, но не более того, так как судьбу трещинки в кристаллическом теле надо обсуждать с учетом упругой энергии, сосредоточенной вокруг нее, а судьба пузырька в жидкости определяется заключенным в нем газом и ее поверхностной энергией. Из расчетов следует, что чем больше был газовый пузырек до начала растяжения, тем более слабым местом он окажется, тем меньшую прочность обнаружит жидкость, в которой этот пузырек расположен. Последнюю фразу можно проиллюстрировать цифрами. Если взять воду, у которой, как известно, $\alpha = 7 \cdot 10^{-2}$ Дж/м^2, то оказывается, что при $R = 10^{-9}$ м будет $\sigma^* \approx \approx 7000$ Н/см^2, при $R \approx 10^{-8}$ м будет $\sigma^* \approx 500$ Н/см^2, а при $R \approx 7 \cdot 10^{-6}$ м будет $\sigma^* \approx 1$ Н/см^2. Как видите, весь набор экспериментальных данных о прочности воды можно естественно объяснить наличием в ней невидимых глазом газовых пузырьков различных размеров. В этом и состоит объяснение различия результатов опытов разных экспериментаторов. Просто они экспериментировали с водой, содержащей разное количество газа, локализованного в пузырьках различных размеров.

Мы уже знаем, что специально обезгаженная вода обнаруживает повышенную прочность. Имеющиеся в ней газовые пузырьки можно убрать, воздействуя на воду большим давлением. Впрочем, вот ссылка на эксперимент, результаты которого явно не двусмысленны. В 1947 г. в «Журнале прикладной физики» (Journal of Applied Physics, 1947, v. 18, p. 162) Харвей, Макелрой и Уайтли опубликовали результаты своих опытов по упрочнению газонасыщенной воды вследствие ее «дегазации». Последнее слово взято в кавычки в связи с тем, что экспериментаторы не удаляли газ из воды, а, приложив к ней давление около $7 \cdot 10^3$ Н/см^2, вынуждали растворяться микроскопические газовые каверны, которые могли бы играть роль зародышей трещин в растягиваемой воде. В их опытах вода, обработанная давлением, противостояла растягивающему давлению 250 Н/см^2. Перед такой обработкой вода обнаружила прочность, близкую к $3 \cdot 10^{-1}$ Н/см^2. Итак, растворение пузырьков упрочнило воду в тысячу раз.

Обратим внимание на еще одну сторону обсуждаемого нами явления. Дело в том, что ультрамикроскопические газовые пузырьки, которые мы рассматривали, могут оказаться нежизнеспособными, лапласовское давление может их сжать и вынудить схлопнуться. При этом газ, содержащийся в пузырьке, растворяется и пузырек исчезает. А пузырьки нам необходимы для объяснения низкой прочности воды. В связи с этим можно предположить, что кроме пузырьков, заполненных газом, в воде имеются случайно возникающие и схлопывающиеся маленькие пузырьки, заполненные паром той жидкости, в которой они расположены, например, водяным. Паровой пузырек будет расти, если окажется, что давление пара $P_{пар}$ больше, или сокращаться, если оно окажется меньше суммы сжимающего лапласовского давления и всестороннего растягивающего давления P.

Напрашивается предсказание. Так как с ростом температуры давление пара жидкости растет, паровые пузырьки будут большего размера и, следовательно, будут определять меньшую прочность жидкости. Проще: с ростом температуры прочность жидкости должна падать.

К сожалению, это мудрое «предсказание» мы с вами сделали тогда, когда падение прочности с ростом температуры давным-давно установлено множеством экспериментов.

Кавитация

Это понятие разъясняется так: образование разрывов сплошности жидкости в результате местного понижения давления в ней. Разрывы жидкости, это конечно же, пузырьки, а значит, о кавитации в нашей книжке рассказать следует. Слово «кавитация» происходит от латинского слова cavitas, что означает «пустота».

Начнем рассказ издалека, на время забыв, что его цель – пузырьки. Временно поставим перед собой совсем иную цель: ознакомимся с основной закономерностью, которой подчиняется жидкость, текущая в трубке. Представим себе горизонтальную трубку переменного сечения, по которой течет жидкость. Там, где площадь сечения поменьше, жидкость течет быстрее, а там, где побольше, – медленнее. Прочно держась за закон сохранения энергии, можно утверждать следующее. Над выделенным объемом текущей жидкости совершается работа сил давления, вынуждающих ее течение. Если жидкость не обладает вязкостью, то эта работа будет расходоваться только на изменение ее кинетической энергии. Закон сохранения энергии дает право приравнять работу сил давления изменению кинетической энергии жидкости. Из этого равенства следует уравнение Даниила Бернулли, которое выполняется в любом сечении трубки:

$$\rho v^2/2 + P = C.$$

В этом уравнении ρ – плотность жидкости, v – скорость ее течения, P – давление жидкости в потоке, а C – величина постоянная. Прочесть его можно так: сумма плотности кинетической энергии и давления в текущей жидкости остается неизменной.

Записанное уравнение является фундаментальным в науке о жидкости и о его создателе Данииле Бернулли (1700–1782) необходимо рассказать.

Как и большинство выдающихся естествоиспытателей XVIII века, Даниил Бернулли занимался очень многими разделами точного естествознания. Он занимался механикой, теорией интегрирования дифференциальных уравнений, гидродинамикой, теорией упругости, теорией вероятностей, кинетической теорией газов, электростатикой. В кругу его творческих интересов оказывались и физиология, и анатомия, и ботаника. В 1738 г. появился его основной труд «Гидродинамика», в котором было сформулировано «уравнение Бернулли».

Свои классические исследования в области гидродинамики Даниил Бернулли начал в те годы, когда жил в России и работал в Петербургской Академии наук.

И еще вот что: Даниил Бернулли был одним из представителей многочисленной династии выдающихся ученых – естествоиспытателей. На протяжении 100 лет члены этой фамилии заведывали кафедрой математики в Базельском университете, около двух веков состояли профессорами этой кафедры, внесли неоценимый вклад в развитие точного естествознания в XVIII и XIX веках. В Данииле Бернулли интересно все: и богатая творческая палитра, и выдающееся влияние на развитие физико-математических наук, и принадлежность к исключительной в истории науки семье.

Вернемся, однако, к формуле Бернулли. Всмотримся в эту формулу внимательно и прочтем ее придирчиво, теперь уже вспомнив о нашей основной цели – о пузырьках в воде. Вот что формула гласит: чем уже сечение трубки, тем больше v, чем больше v, тем меньше P, а это означает, что v может оказаться настолько большим, что давление P станет меньше некоторого критического P^*. Газовые или паровые пузырьки, имеющиеся в движущейся жидкости и попавшие в зону, где $P < P^*$, начинают увеличиваться в объеме, жидкость «кавитирует», превращаясь в пенообразную среду. Перемещаясь вместе с потоком в область, где давление $P > P^*$, пузырьки начинают схлопываться и исчезают.

Итак, мы с уверенностью предсказываем появление пузырьков в текущей жидкости, основываясь, как на фундаменте, только на законе сохранения энергии. Фундамент надежный и пузырьки искать следует.

Ознакомимся теперь с экспериментом, который свидетельствует об обоснованности предсказания, о том, что пузырьки возникают именно там, где им возникнуть надлежит, т. е. в объеме, где скорость течения воды велика.

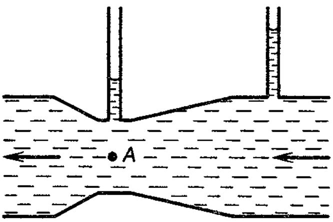


Схема течения жидкости в трубке переменного сечения

Эксперимент очень прост, его можно воспроизвести в любой школьной лаборатории. Например, так. Из плексигласа следует изготовить прозрачную коробку, полости которой придать форму сопла: широкая часть переходит в узкую, а затем опять расширяется. Сквозь коробку направить воду, гонимую насосом. Ее скорость можно изменять – это не сложно. Вода, текущая медленно, не обнаруживает никаких видимых особенностей. А вот когда скорость достигает некоторой величины – в узком сечении сопла, в области, обозначенной на рисунке «А», главным образом вблизи поверхности сопла появляется белесое облачко, состоящее из возникших пузырьков.

Вблизи того места, где пузырьки рождаются, они и схлопываются, если, увлекаемые текущей водой, сместятся в область, где скорость поменьше, а давление повыше. Это схлопывание происходит с большой скоростью и сопровождается рождением звукового импульса. От пузырька – одиночный импульс, от облака пузырьков – шум. Разумеется, необозримо слабее, но все же сродни тому, который рождает пенящийся водопад.

Для появления и развития каверн необходимо наличие в жидкости «ядер кавитации» – микроскопических включений газа, нерастворимого в объеме жидкости. Обычно предполагают, что эти газовые включения связаны с микроскопическими твердыми частицами, например, частицами пыли.

Зародышевые газовые включения можно дезактивировать либо специальной очисткой жидкости, либо приложением к ней большого положительного давления, которое способствует растворению зародышевых пузырьков. После этого жидкость становится более однородной и устойчивой по отношению к зарождению и развитию каверн. В реальности этого эффекта мы убедились, обсуждая в очерке о прочности жидкости специально поставленные опыты.

Мы все время рассуждаем, имея в виду направленный поток жидкости. В действительности – и это легко понять – кавитация может происходить и тогда, когда в жидкости по какой-либо причине возникают участки, в которых скорость ее движения различна. Ну, например, вблизи вращающихся гребных лопастей теплохода, или вблизи стержня, вибрирующего в воде.

«Капля камень точит» – это известно всем. А вот то, что пузырек металл разрушает,– это, кажется, не общеизвестно, а дело обстоит именно так. Зарегистрировано множество случаев разрушения гребных винтов быстроходных кораблей кавитационными пузырьками. Эти разрушения иной раз выводят винт из строя всего за несколько часов хода корабля. Кавитационная зона вблизи вращающегося гребного винта строителями кораблей тщательно исследуется с целью избрать оптимальную форму, при которой без ущерба для прочих характеристик корабельного винта его кавитационная стойкость будет наибольшей. Это важный этап в конструировании и изготовлении корабля.

А вот еще один пример разрушающего действия кавитации. Если в воде будет вибрировать металлический стержень, его торцевая поверхность покроется очагами кавитационного разрушения: пузырьки металл разрушают!

Как это происходит? Есть несколько предположений о механизме передачи энергии летящего пузырька поверхности металла. Достигнув поверхности препятствия, пузырек может быстро схлопнуться, возбудить ударную волну, и это повлечет за собой удар воды по поверхности. Физики, подробно изучавшие кавитационные разрушения металлов, убедились в том, что импульсные давления, воспринимаемые поверхностью, оказываются достаточными, чтобы пузырьки создавали и развивали очаги разрушений на поверхности металла. Например так: многократно повторяющиеся импульсные напряжения приводят к локальным усталостным разрушениям.

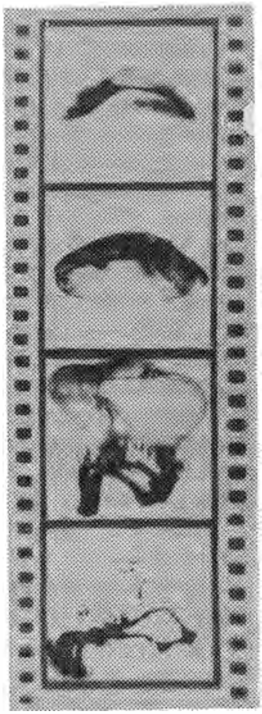
Дождевая капля раздувается в пузырь

Этому очерку, вообще говоря, место в первой главе, посвященной пузырям, ограниченным пленкой. Но для того чтобы понять, как из дождевой капли раздувается пузырь, необходимо знать нечто такое, что излагается в третьей главе. Именно поэтому очерк в ней и оказался.

Приняв сказанное во внимание, приступим к делу.

В американском «Журнале прикладной физики» (Journal of Applied Physics, 1956, v. 27, p. 10) два физика, Магарвей и Тейлор, опубликовали подборку мгновенных фотографий больших падающих капель. На этих фотографиях отчетливо видно, что летящая капля вначале превращается в уплощенную снизу лепешку, потом обретает форму мелкой шапочки, затем раздувается в тонкостенный водяной пузырь, открытый со стороны, обращенной к Земле,— в эдакое жидкое подобие парашюта. В полете водяной пузырь раздувается, затем разрушается и превращается во множество капель различных размеров. Мы будем интересоваться летящим пузырем на том этапе его биографии, когда он еще не лопнул.

Подумаем над фотографиями Магарвея и Тейлора. Вначале, временно упростив реальную ситуацию, предположим, что капля (еще не пузырь!) падает в невозмущенном воздухе. Собственно, безучастным к падающей капле воздух оставаться не может, поэтому слово «невозмущенный» означает лишь, что, пропуская сквозь себя каплю, воздух не завихряется и обтекает летящую каплю, а капля движется в ламинарном режиме. И еще предположим, что сила тяжести капли и сила сопротивления воздуха уже уравновешены, и капля летит с постоянной скоростью. В этих условиях капля должна была бы приобрести форму совсем не такую, какую наблюдали американские физики *). Чтобы в этом убедиться, поступим так, как ранее мы поступили, обсуждая форму мыльного пузыря. Охарактеризуем форму падающей капли двумя радиусами кривизны участков ее поверхности: в данном случае нижней, лобовой $R_л$ и верхней, тыльной $R_т$. Для нашей цели этих двух величин вполне достаточно.



Так в полете капля превращается в пузырь

Давление жидкости у лобовой поверхности должно быть большим, чем у тыльной, так как разность сил давления должна уравновешивать вес столбика жидкости, опирающегося на центральный участок лобовой поверхности. В то же время в условиях ламинарного течения давления воздуха у лобовой и тыльной поверхностей одинаковы. Поэтому разность давления можно создать только за счет разности кривизны поверхностей

$$2\alpha(1/R_{лоб} - 1/R_{тыл}) = \rho g h.$$

Отсюда следует, что $R_{лоб}$ должно быть меньше, чем $R_{тыл}$. Падающая капля заостряется по направлению к Земле! А Магарвей и Тейлор наблюдали обратную картину: лобовая поверхность капли вначале уплощается, а тыльная заостряется, и далее из дождевой капли выдувается водяной пузырь, напоминающий парашют.

Вспомним: в начале наших рассуждений мы упростили реальную ситуацию, пренебрегли действительностью и, видимо, поэтому оказались в противоречии с фактами.

*) См. например, *Слободецкий И. Ш.* – Квант, 1970, № 8.

Факты следует истолковывать, нарочито не утаивая правду. Эту недостающую нам правду можно привнести в наши рассуждения извне, а можно поступить по-иному — извлечь ее из наблюдений над падающей каплей. Воспользуемся второй возможностью и для достоверности убедимся, что она не противоречит первой.

Магарвей и Тейлор показали, что падающая капля в полете не сохраняет свою форму, а деформируется. Наблюдаемая деформация капли может происходить вследствие разности давлений в воздухе перед каплей и за ней: первое должно быть больше второго. Эта разность может появиться лишь при условии, что движение воздуха вблизи лобовой и тыльной поверхностей капли происходит в различных режимах. Все станет на свои места, если мы откажемся от начального предположения о том, что воздух нигде не завихряется и везде вокруг капли ведет себя «ламинарно». Предположим, что перед каплей «ламинарность» сохраняется, а за ней возникают вихри, т. е. движение воздуха становится турбулентным: перед каплей воздух движется с меньшей скоростью и в нем давление больше, а за ней, где возникают вихри,— с большей скоростью, и давление в нем меньше. В очерке, посвященном кавитации, мы подробно разбирались в том, что скорость движения жидкости и давление в ней — величины взаимосвязанные: большая скорость — меньшее давление. Здесь поведение аналогичное, однако оно обнаруживает себя не в жидкости, а в газе.

Разность давлений, которая превращает дождевую каплю в водяной пузырь, называется лобовым сопротивлением воздуха падающей капле. Его значение можно оценить. Сделаем это.

Применительно к всплыванию газового пузырька в жидкости мы это уже сделали и описали в одном из предыдущих очерков. Мы вычислили, что быстро всплывающему газовому пузырьку вода сопротивляется с силой (см. с. 93) $F \approx \pi R^2 \rho v^2$, т. е. оказывается лобовое сопротивление $P = F/\pi R^2 \approx \rho v^2$. Эта оценка пригодна и для нашего случая: не газовый пузырек в воде, а водяная капля в газе! Количественное отличие — лишь в значении плотности среды: не вода вокруг пузырька, а газ вокруг водяной капли.

Вот сейчас мы, видимо, делаем правильный вывод из результатов наблюдений над процессом формирования водяного пузыря из капли.

Лобовое сопротивление раздувает падающую каплю в пузырь. Все, кажется, объяснилось. И все же одно важное обстоятельство осталось вне наших рассуждений. Дело в том, что капля, раздуваемая давлением P в пузырь, существенно увеличивает свою поверхность, а значит, и поверхностную энергию. Процесс явно энергетически невыгодный, и, следовательно, должно обнаружиться давление, препятствующее формированию пузыря, стремящегося сохранить сферическую форму капли. Это — лапласовское давление, обусловленное искривленностью поверхности капли. Очевидно, для того чтобы преобразование летящей капли в пузырь происходило, давление $P_\uparrow$ должно существенно превосходить лапласовское, т. е. должно выполняться условие

$$\rho v^2 \gg 2\alpha/R.$$

Его лучше записать в другой форме:

$$Rv^2 \gg 2\alpha/\rho.$$

Прочесть наш результат следует так: чтобы падающая капля могла раздуваться в пузырь, произведение ее начального радиуса на квадрат скорости падения должно превосходить значение $A = 2\alpha/\rho$, которое для каждой данной жидкости постоянно. Для воды $\alpha \approx 7 \cdot 10^{-2}$ Дж/м^2, а $\rho_{\text{возд}} \approx 1{,}3$ кг/м^3 и, следовательно, $A \approx 10^{-1}$ м^3/с^2. Это означает, что капля воды, имеющая, например, радиус $R \approx 5 \cdot 10^{-2}$ м и падающая со скоростью $v \approx 10$ м/с может превращаться в пузырь, так как $Rv^2 \approx 5$ м^3/с^2, что много больше A. А вот маленькая капля, имеющая радиус $R \approx 5 \cdot 10^{-4}$ м и падающая со скоростью $v \approx 5 \cdot 10^{-1}$ м/с, не будет раздуваться в пузырь, так как $Rv^2 \approx \approx 1{,}2 \cdot 10^{-4}$ м^3/с^2, что много меньше, чем A.

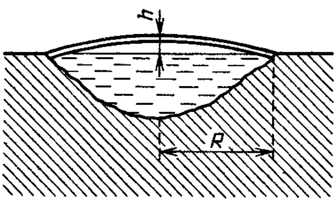
Здесь следует заметить, что последнее неравенство, определяющее условие, при котором капля может раздуться в пузырь, можно обсуждать лишь тогда, когда выполняется условие осуществления турбулентности: $Rv \gg \eta/\rho$, о котором мы говорили в очерке «Пузырек всплывает в жидкости». Применительно к нашему примеру оно выполняется. Читатель это легко проверит, учтя, что для воздуха $\eta \approx 2 \cdot 10^{-7}$ кг$\cdot$м$^{-1}\cdot$с$^{-1}$, а $\rho \approx \approx 1{,}3$ кг/м^3.

Пузырек Паустовского

Эти бесформенные газовые пузырьки-прослойки отчетливо видны поздней осенью под тонкой корочкой льда на подмерзающих лужицах. Если слегка пальцем нажать на ледяную корку, вода под ней начнет переливаться, пузырек как бы оживет. В одном из своих проникновенных описаний поздней осени замечательный советский писатель К. Г. Паустовский вспоминает, что очень часто между водой и ледяной коркой в пузырьке расположен одинокий палый листок. Ведомый подсказкой Паустовского, я наблюдал много таких лужиц, оживленных палым листком. Со временем, когда морозы станут злее, лужица промерзнет насквозь и листок вмерзнет в тело льда.

Посмотрим на пузырек-прослойку под ледяной коркой не как лирики, а как физики. Попытаемся понять, каким образом эта газовая прослойка образовалась между водой и ледяной корочкой.

Вода – жидкость аномальная в том смысле, что при кристаллизации ее объем увеличивается: плотность воды



Пузырек Паустовского

больше плотности льда. И это великое благо природы, благодаря которому водоемы не промерзают насквозь. Так называемый положительный скачок объема при формировании льда приводит к тому, что корочке оказываются тесными контуры той лужи, на поверхности которой она формировалась. Последствий этого обстоятельства может быть несколько. Стесненная корка может просто лопнуть под действием возникших напряжений, и сквозь трещину на поверхности льда проступит вода. А может произойти иное: корочка вспучится, и между нею и водой возникнет пространство, которое заполнится воздухом через какую-то случайную тонкую щелку в корке. Вот это пространство и превратится в тот пузырь, в объеме которого Паустовский увидел опавший листок.

Может показаться, что под коркой возникает совсем тонкая газовая прослойка, где лепестку будет тесно. Легко, однако, убедиться в том, что она будет не такой уж тонкой. Оценим ее толщину. Чтобы сделать это попроще, предположим, что лужица круглая (радиуса R), что возникшая на ней ледяная корка вспучилась симметрично и что в центре лужицы от поверхности воды она отошла на расстояние h. Предположим, что если бы корка не была закреплена по периметру лужицы, она имела бы радиус не R, а $R + \Delta R$. Величина $2(R + \Delta R)$ имеет смысл длины дуги центрального сечения ледяной корки, закрепленной по периметру лужицы. Величина ΔR конечно же значительно меньше, чем R. Все эти обозначения приведены на рисунке. Далее все совсем просто, не сложнее теоремы Пифагора, из которой следует, что $h^2 + R^2 = (R + \Delta R)^2$. Если учесть, что ΔR мала по сравнению с R, а следовательно, $2R \cdot \Delta R \gg (\Delta R)^2$, то из приведенного уравнения следует

$$h \approx (2R \cdot \Delta R)^{1/2}.$$

Значение ΔR можно легко определить, зная значение скачка объема $q = \Delta V/V$ при кристаллизации воды. Так как $q = 3\Delta R/R$, то

$$h \approx R\,(2q/3)^{1/2}.$$

Допустим, что мы наблюдаем пятисантиметровую лужицу, т. е. $R = 2{,}5$ см. Так как $q \approx 10^{-1}$, то $h \approx 0{,}6$ см. Как видите, значение совсем не малое. Листику есть, где поместиться.

Вот, пожалуй, и все, что я хотел рассказать об одной из красот поздней осени, о пузырьке под тонкой корочкой льда.

Пузырьковедение

Так геологи, занимающиеся восстановлением предыстории минералов, в шутку называют один из разделов своей науки. Этот раздел посвящен изучению информации, которая может быть извлечена из того факта, что в кристаллах есть полости, заполненные жидкостью, газом или одновременно и жидкостью, и газом так, что газ образует пузырек, плавающий в жидкости. Наиболее информативными оказываются последние включения. Называются они газожидкими. Именно они нас и интересуют.

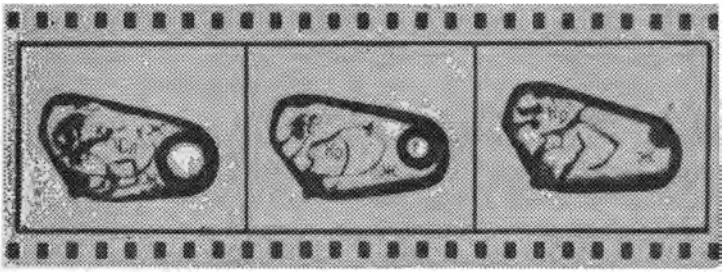
Речь идет о том, что, изучая включения в ископаемом минерале, можно получить много важных сведений о том, в каких условиях он зарождался и рос, каким воздействиям – тепловым и механическим – он подвергался за время своей невообразимо долгой жизни.

Газожидкое включение в кристалле может возникнуть в следующем процессе. Кристалл растет из горячего раствора и в процессе роста захватывает немного жидкости, которая полностью заполняет необходимую ей полость, не оставляя места для газа. Со временем после остывания в связи с тем, что тепловой коэффициент объемного сжатия у жидкости больше, чем у кристалла, жидкость сожмется больше, чем кристалл, и в полости должен будет возникнуть газовый пузырек. Включение, которое было жидким при температуре образования кристалла T_0, при более низкой температуре T станет газожидким. Очевидно, естествен обратный ход рассуждений: газожидкое включение после нагрева от температуры T до температуры T_0 должно превратиться в однородное жидкое включение, пузырек должен исчезнуть. Проделав такой опыт, мы определим температуру T_0, при которой зародился и рос кристалл. Скажем о том же иными словами и чуть торжественнее: в этом опыте кристалл нам расскажет о температуре, при которой он образовался. Очень красивая возможность выведать у кристалла температуру образования!

Нужны, однако, оговорки. Проводя опыты по описанной схеме, экспериментатор может столкнуться с не очень, мягко говоря, точной информацией. Ведь могло оказаться, что в процессе роста вместе с жидкостью кристалл заключал в себе немножко газа. В этом случае при остывании в газожидком включении пузырек будет большим, чем тот, который может быть обусловлен разностью температуры $T_0 - T$.

Такой пузырек при нагреве исчезнет при температуре более высокой, чем T_0. Дело может обстоять и еще сложнее: газовый пузырек в жидком включении может появиться не в связи с остыванием, а по какой-либо иной причине. Впрочем, опытный исследователь всегда сможет найти косвенные свидетельства и соображения, дающие ему возможность безошибочно воспользоваться основной идеей «пузырьковедения».

Нехитрая идея, на которой основано «пузырьковедение», используется очень широко. Вот один пример использования этой идеи по прямому назначению, для определения температуры, при которой в земных недрах формировался топаз. На рисунке приведена кинограмма, полученная в процессе нагрева участка кристалла, в котором расположено газожидкое включение. С ростом температуры объем газовых пузырьков в газожидком включении явно уменьшается и при $T = 540\,^{\circ}\mathrm{C}$ пузырьки практически исчезают. Косвенные данные и соображения



Последовательные стадии растворения газового пузырька в газожидком включении в минерале

геологов свидетельствуют о том, что кристаллы топаза действительно формируются при близкой температуре. Данные «пузырьковедения» оказываются разумными.

Жидкое включение с пузырьком в кристалле

Этот очерк, как и предыдущий, посвящен газовым пузырькам, которые расположены в жидких включениях в кристалле. Нас будет интересовать судьба пузырька в том очень распространенном случае, когда кристалл нагрет неоднородно, т. е. разные его участки имеют разную температуру. Это не искусственно придуманная ситуация: жидкие включения с газовым пузырьком в ископаемых, в неоднородно нагретых минералах в природе встречаются весьма часто и, безусловно, заслуживают пристального к себе внимания. Именно газовый пузырек определяет свойства таких включений, и это оправдывает наш интерес к ним.

Существует много процессов, при которых может образоваться такое включение. С одним мы уже встречались, обсуждая «пузырьковедение»: жидкое включение, заключенное в кристалле, остывает вместе с ним, сжимается больше, чем кристалл, и в каком-то месте отрывается от кристалла. При этом образуется газовый пузырек. Может произойти и по-иному: кристалл с жидким включением нагревается, включение, расширяясь, деформирует вокруг себя кристалл, а затем, после охлаждения, принимает первоначальный объем, а избыточный объем деформированной полости становится объемом газового пузырька. А может быть и так: формируясь из жидкого раствора, кристалл захватывает капельку раствора вместе с газовым пузырьком.

Как оказывается, процессы, которые происходят во включениях с газовым пузырьком, существенно зависят от соотношения между объемом пузырька и объемом жидкости. Будем говорить так: «большой» пузырек имеет объем значительно больше объема жидкости во включении, а «маленький» имеет объем значительно меньше объема жидкости, заключенной во включении. Так и построим наш рассказ: вначале о «большом», а затем о «малом» пузырьке.

Прежде, однако, чем мысленно поселить в жидком включении пузырек, подумаем над тем, что будет с включением без пузырька. Оказывается, что в неоднородно нагретом кристалле такие включения движутся к теплу. Движение к теплу жидких включений происходит по следующей причине: на лобовой поверхности, где температура повыше, кристалл растворяется, а на тыльной поверхности, где температура пониже, растворившееся вещество оседает, а это и означает, что жидкое включение движется к теплу. И это можно наблюдать в обычном микроскопе, который есть в школьной лаборатории.

Описанные ниже наблюдения были сделаны в опытах с естественными монокристаллами каменной соли (NaCl), в которых были жидкие и газожидкие включения. Впрочем, совершенно аналогичные наблюдения следуют и из опытов со многими иными кристаллами.

Теперь поселим в жидком включении большой пузырек. Выявляется нечто неожиданное: в температурном поле такое сложное газожидкое включение движется не в горячую, а в холодную область. Большой пузырек заставил жидкое включение обратить направление движения: не к теплу, а к холоду!

Механизм этого явления оказывается следующим. В таком включении жидкость, как правило, располагается в виде слоя, прилегающего к поверхности кристалла. В том участке слоя, где температура выше, жидкость активно испаряется, концентрация раствора увеличивается и он становится пересыщенным. Избыточное вещество из раствора будет выпадать, осаждаясь на горячем участке поверхности. На противоположном, холодном участке все будет происходить наоборот: пар конденсируется в воду, в связи с чем концентрация растворенного вещества понизится, раствор станет ненасыщенным, и вещество кристалла, чтобы восстановить равновесие, немного растворится. Описанный процесс сопровождается течением жидкости вдоль пленки в направлении, противоположном движению включения. Именно благодаря этому потоку включение все время поддерживается в состоянии, при котором движение возможно. На приводимом схематическом рисунке указаны и потоки пара через объем пузыря, и потоки раствора вещества кристалла вдоль жидкого слоя, разделяющего пузырь и кристалл.

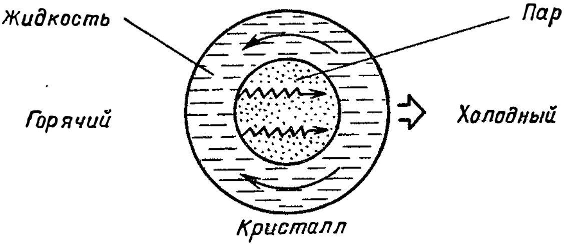
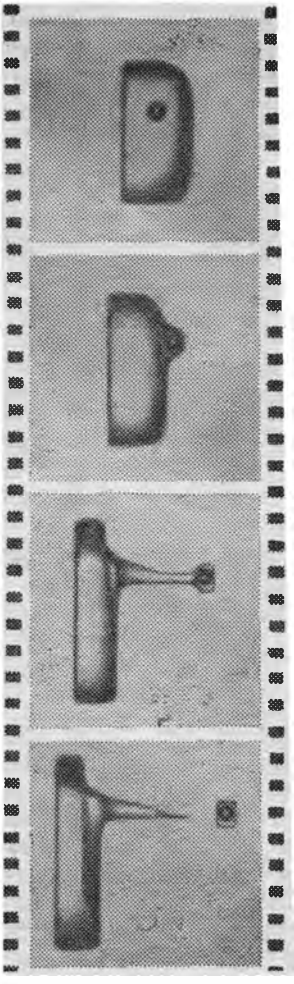


Схема движущегося газожидкого включения в неоднородно нагретом кристалле: круговые стрелки – потоки жидкого раствора, волнистые стрелки – поток пара в объеме пузырька, широкая стрелка – направление движения включения

Итак, на горячем участке поверхности включения вещество кристалла осаждается, на холодном – растворяется, а это и значит, что газожидкое включение движется к холоду. Неожиданное следствие вполне естественных причин!

Обратимся теперь к другому предельному случаю и мысленно поселим в жидком включении маленький пузырек. В неоднородно нагретом кристалле вначале эти включения движутся как обычные жидкие включения. Это понятно: маленький пузырек в объеме большого жидкого включения существенно не может повлиять на то, что должно происходить с жидкостью. На судьбу жидкости пузырек практически не влияет. А вот для себя газовый пузырек избирает судьбу несколько неожиданную: он стремится покинуть включение, обособиться в виде нового отдельного включения. В результате газожидкое включение с маленьким пузырьком распадается на два. Одно из них — жидкое включение, а второе — газовый пузырек с очень небольшим количеством жидкости. А теперь — чуть подробнее о том, как и почему может произойти разрыв газожидкого включения.



Киномонтаж, иллюстрирующий распад жидкого включения с пузырьком в кристалле

Ранее мы узнали о том, что в неоднородно нагретой жидкости пузырек должен перемещаться. Сила, вынуждающая его двигаться, определяется перепадом поверхностного натяжения $\Delta\alpha/\Delta x$, который в конечном счете определяется зависимостью поверхностного натяжения от температуры. Оказывается (об этом рассказано в очерке о пузырьке, покоящемся в жидкости), что в чистой, беспримесной жидкости пузырек движется в более нагретую область. А вот если, как в наших включениях, жидкость является раствором, содержащим атомы постороннего вещества, то знак величины $\Delta\alpha/\Delta x$ может измениться и пузырек будет перемещаться в холодную область. Именно это и происходит в газожидком включении во многих кристаллах, в том числе и в кристаллах каменной соли: пузырек прижимается не к горячей, а к холодной стенке включения. Между ним и кристаллом должна сохраниться жидкая прослойка. Если бы она исчезла, оголилась бы поверхность кристалла, а это невыгодно, так как поверхностная энергия кристалла больше суммы поверхностных энергий границ кристалл — жидкость и жидкость — пар. Скажем это иными словами: если сформулированное условие выполняется, между пузырьком и кристаллом будет жидкая прослойка. В опытах, которые мы обсуждаем, она заведомо была. Благодаря этой прослойке газовый пузырек оказывается окруженным жидкостью подобно тому, как это изображено на уже упоминавшемся схематическом рисунке газожидкого включения.

Итак, жидкое включение, содержащее газовый пузырек, подготовилось к распаду, жидкость и пузырек пространственно обособились, образовав как бы два пока еще сосуществующих включения: жидкое и газожидкое. В неоднородно нагретом кристалле жидкое включение будет двигаться к теплу (это мы знаем!), а газожидкое — к холоду (и это мы знаем!). Два эти процесса завершатся разрывом включения.

Наблюдая в микроскоп за тем, как со временем происходит изменение формы включения, предшествующее его разрыву, можно увидеть, что маленький газовый пузырек как бы вдавливается, внедряется в твердый кристалл, сохраняя при этом связь с материнским жидким включением. Этот процесс кинематографировался. Монтаж кадров отснятого фильма отчетливо иллюстрирует происходящее при разрыве газожидкого включения.

Здесь уместно заметить, что разрыв включения может произойти и в условиях, когда по какой-либо причине одна из частей включения не может двигаться. Например, газовый пузырек оказывается прикрепленным к поверхности включения. Это тоже наблюдалось!

Пузырек, существующий в жидком гелии

В названии очерка очень важно слово: «существующий». Не возникший и тут же схолопнувшийся, а длительно существующий. Легко представить себе условие, при котором пузырек может оказаться жизнеспособным. Для этого, очевидно, необходимо, чтобы лапласовское давление, сжимающее пузырек, компенсировалось внутренним давлением, растягивающим его. Ну, скажем, давлением газа, заключенного в пузырьке. Эта причина растягивающего давления — газ в пузырьке! — простейшая, распространенная и посвящать ей специальный очерк не следовало бы, тем более, что такие пузырьки мы многократно обсуждали. А вот о пузырьке, существующем в гелии, рассказать стоит. В пузырьке газа нет, а он не схлопывается, существует. Он длительно жизнеспособен, он как-то умудряется противостоять сжимающему его лапласовскому давлению.

Начнем рассказ издалека с утверждения, очень важного для дальнейшего: жидкий гелий «возражает» против насильственного внедрения в его объем свободных электронов. Иначе об этом можно сказать так: «по собственной инициативе» в гелий электроны проникать не станут, точнее, не могут. Однажды на физическом семинаре я услышал понравившееся мне утверждение: «чтобы электрон проник в объем жидкого гелия, ему надо помочь преодолеть „работу входа"». Это в отличие от «работы выхода», которая должна быть выполнена, чтобы, например, электрон покинул металл. Причина существования «работы входа» проста. Электронная оболочка атома гелия, в которой находится два электрона, завершена, имеет «благородную структуру». Именно в этом смысле гелий, как известно, газ благородный. Третий электрон не нужен ни одному из атомов, образующих жидкий гелий, а значит, и гелию в целом. Если бы посторонний третий электрон пристроился к атому гелия — энергия атома возросла бы и атом избавился бы от лишнего электрона.

Представим себе, однако, что электрону сообщена «работа входа» и он все же оказался в объеме жидкого гелия. Где-то далеко от поверхности жидкости. Экспериментаторы это делали, например, так: помещали в сосуд с жидким гелием радиоактивный источник, излучавший электроны в гелий.

Какая участь уготована неугодному электрону? Их может быть две.

Во-первых, электрон может оказаться в положении бездомного, перемещающегося между не желающими его приютить «благородными» атомами. Они «благородны» в ином, в указанном выше смысле.

Во-вторых, атомы ближайшего окружения, отталкивающиеся от свободного электрона, могут создать вокруг него пустоту, полость, пузырек, радиус которого заведомо больше межатомного расстояния. Электрон окажется заключенным в этом пузырьке. Он и очутился в объеме жидкого гелия, и не соприкасается с атомами, образующими жидкость. Если нет возможности вытолкнуть из себя электрон, который оказался в объеме жидкого гелия далеко от его поверхности, гелий создает внутреннюю поверхность, ограничивающую пузырек, и выталкивает электрон в пустоту пузырька. Образование пузырька можно также описать, предполагая инициативу этого у электрона: он создал пристанище в виде пузырька и поселился в нем, избегая встречи с атомами гелия, пренебрегающими свободным электроном.

Из двух возможностей осуществляется, видимо, та, которая обусловит меньшую избыточную энергию, связанную с электроном, не угодным гелию.

С первой должна быть связана энергия, близкая к «работе входа». Экспериментаторы ее надежно определили, она оказалась

$$\varepsilon_{e1} \approx 1{,}0 \text{ эВ*}).$$

А вот энергию ε_{e2}, связанную со второй поселением электрона в пузырьке, мы определять не станем – это не просто. Но поскольку пузырек существует, то, видимо, именно энергия ε_{e2} оказывается меньшей, чем ε_{e1}.

Определим радиус пузырька, который способен существовать, пряча в себе электрон. Для этого заключенный в нем электрон должен обеспечить растягивающее давление P_e, которое сможет противостоять сжимающему лапласовскому.

Размещение электрона в пузырьке (как и неприятие электрона гелием) есть эффект квантовый. Это означает, что его нельзя объяснить теми классическими законами физики, которые мы легко приемлем в мире макроскопических объектов. Электрон – представитель микромира, ему писаны квантовые законы. По квантовым законам микромира электрон, который локализован в пузырьке и не имеет права выйти за его пределы, должен в объеме пузырька все время колебаться. В том и состоит квантовость явления, что законы микромира запрещают электрону упасть на донышко пузыря и лежать, неподвижно притаившись. А именно это и сделает макроскопический шарик (аналог электрона) в полости, расположенной в диэлектрике (аналог пузырька в гелии).

Я хотел в помощь читателю на рисунке изобразить комплекс «электрон – пузырек» в гелии: в жидкости кружочек (пузырек!), а в нем черная точка (электрон). Но такой классический рисунок рисовать нельзя, квантовые законы запрещают электрону быть в положении покоящейся точки, он обязан все время двигаться.

Из квантовых законов следует (здесь надо поверить!), что эффективное давление, создаваемое мечущимся элек-

*) Напомним, что 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

троном, определяется формулой

$$P_e = \pi^2 \hbar^2/4m_e R^5.$$

Воспользовавшись условием

$$P_e = P_{\text{л}},$$

можно найти радиус устойчивого пузырька, содержащего электрон:

$$R^* = (\pi^2 \hbar^2/8m_e \alpha)^{1/4}.$$

Так как

$$\hbar = 1{,}05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$
$$m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

и

$$\alpha = 36 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/м}^2,$$

то

$$R^* \approx 18 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Зная межатомное расстояние в гелии $a \approx 4{,}5 \cdot 10^{-10}$ м, легко убедиться в том, что

$$R^* \approx 4a.$$

Это значит, что объем пузырька покинуло около 250 атомов гелия.

Заряженный пузырек в гелии может себя обнаружить во многих явлениях. Вот пример. Во внешнем электрическом поле подобно свободному электрону он должен двигаться под влиянием силы

$$F = eE$$

(E – напряженность поля). Движущемуся пузырьку следует, однако, приписать массу $m_{\text{п}}$, близкую к массе гелия в объеме пузырька, т. е. несравненно большую, чем масса электрона. Действительно, так как

$$m_{\text{п}} = 4\pi R^{*3} \rho_{\text{He}}/3$$

($\rho_{\text{He}} = 1{,}1 \cdot 10^2$ кг/м^3 – плотность гелия), то

$$m_{\text{п}}/m_e \approx 4\pi R^* \rho_{\text{He}}/3m_e \approx 3 \cdot 10^6.$$

Частица (пòра!) с зарядом электрона, окажется в 3 миллиона раз тяжелее его! А это означает, что подвижность пузырька с электроном во внешнем поле будет значительно меньшей, чем подвижность одиночного электрона. Обсуждая подвижность пузырька, надо еще учесть, что он «макроскопический» и, что, двигаясь, он должен подчиняться закону Стокса и испытывать трение о гелий. Это тоже понижает его подвижность. Именно поэтому «пузырьковая» электропроводность гелия оказывается очень малой.

Не будем подробно обсуждать другие явления, в которых обнаруживает себя заряженный пузырек в гелии. Удовлетворимся тем, что своей цели мы достигли, обсудив, как и почему может образоваться и существовать в гелии пузырек. Существовать, не схлопываясь!

* * *

В заключении книги я хочу напомнить читателю процитированную в ее начале фразу Кельвина о мыльном пузыре – неисчерпаемом источнике уроков физики. Его мысль, пожалуй, можно обобщить и на пузыри, рождающиеся, живущие и исчезающие в жидкости.

И о мыльных пузырях, и о пузырях в жидкости в нашей книге рассказано лишь кое-что. И конечно же, неисчерпаемый источник остался неисчерпанным.

Яков Евсеевич Гегузин

ПУЗЫРИ

Редактор *В. Я. Дубнова*
Технический редактор *Л. В. Лихачева*
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*
Корректоры *Л. И. Назарова, Н. Д. Дорохова*

ИБ № 12268

Сдано в набор 22.01.85. Подписано к печати 02.08.85. Т-16689. Формат $84 \times 108^{1}/_{32}$. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура таймс. Печать высокая. Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр.-отт. 9,66. Уч.-изд. л. 9,12. Тираж 110 000 экз. Заказ № 1784. Цена 30 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136 Ленинград П-136, Чкаловский пр., 15.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ В СЕРИИ «БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»:

Вып. 1. М. П. Бронштейн. Атомы и электроны.
Вып. 2. М. Фарадей. История свечи.
Вып. 3. О. Оре. Приглашение в теорию чисел.
Вып. 4. Опыты в домашней лаборатории.
Вып. 5. И. Ш. Слободецкий, Л. Г. Асламазов. Задачи по физике.
Вып. 6. Л. П. Мочалов. Головоломки.
Вып. 7. П. С. Александров. Введение в теорию групп.
Вып. 8. В. Г. Штейнгауз. Математический калейдоскоп.
Вып. 9. Замечательные ученые.
Вып. 10. В. М. Глушков, В. Я. Валах. Что такое ОГАС?
Вып. 11. Г. И. Копылов. Всего лишь кинематика.
Вып. 12. Я. А. Смородинский. Температура.
Вып. 13. А. Е. Карпов, Е. Я. Гик. Шахматный калейдоскоп.
Вып. 14. С. Г. Гиндикин. Рассказы о физиках и математиках.
Вып. 15. А. А. Боровой. Как регистрируют частицы.
Вып. 16. М. И. Каганов, В. М. Цукерник. Природа магнетизма.
Вып. 17. И. Ф. Шарыгин. Задачи по геометрии: планиметрия.
Вып. 18. Л. В. Тарасов, А. Н. Тарасова. Беседы о преломлении света.
Вып. 19. А. Л. Эфрос. Физика и геометрия беспорядка.
Вып. 20. С. А. Пикин, Л. М. Блинов. Жидкие кристаллы.
Вып. 21. В. Г. Болтянский, В. А. Ефремович. Наглядная топология.
Вып. 22. М. И. Башмаков, Б. М. Беккер, В. М. Гольховой. Задачи по математике: алгебра и анализ.
Вып. 23. А. Н. Колмогоров, И. Г. Журбенко, А. В. Прохоров. Введение в теорию вероятностей.
Вып. 24. Е. Я. Гик. Шахматы и математика.
Вып. 25. М. Д. Франк-Каменецкий. Самая главная молекула.
Вып. 26. В. С. Эдельман. Вблизи абсолютного нуля.
Вып. 27. С. Р. Филонович. Самая большая скорость.
Вып. 28. Б. С. Бокштейн. Атомы блуждают по кристаллу.
Вып. 29. А. В. Бялко. Наша планета — Земля.

Вып. 30. М. Н. Аршинов, Л. Е. Садовский. Коды и математика.

Вып. 31. И. Ф. Шарыгин. Задачи по геометрии: стереометрия.

Вып. 32. В. А. Займовский, Т. Л. Колупаева. Необычные свойства обычных металлов.

Вып. 33. М. Е. Левинштейн, Г. С. Симин. Знакомство с полупроводниками.

Вып. 34. В. Н. Дубровский, Я. А. Смородинский, Е. Л. Сурков. Релятивистский мир.

Вып. 35. А. А. Михайлов. Земля и ее вращение.

Вып. 36. А. П. Пурмаль, Е. М. Слободецкая, С. О. Травин. Как превращаются вещества.

Вып. 37. Г. С. Воронов. Штурм термоядерной крепости.

Вып. 38. А. Д. Чернин. Звезды и физика.

Вып. 39. В. Б. Брагинский, А. Г. Полнарев. Удивительная гравитация.

Вып. 40. С. С. Хилькевич. Физика вокруг нас.

Вып. 41. Г. А. Звенигородский. Первые уроки программирования.

Вып. 42. Л. В. Тарасов. Лазеры: действительность и надежды.

30 коп.