

Ф. АУЭРБАХ

**Сеть
аномалий
воды**



ФИЗИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА

Проф. Ф. АУЭРБАХ

СЕМЬ АНОМАЛИЙ ВОДЫ

ПЕРЕВОД С НЕМЕЦКОГО ПОД РЕДАКЦИЕЙ

А. П. АФАНАСЬЕВА

Профессора Второго Петроградского Университета

С 12 РИСУНКАМИ

1919 г.



Prof. F. AUERBACH

DIE SIEBEN ANOMALIEN DES WASSERS

I.

Вещества нормальные и аномальные.

Среди людей более всего распространен так называемый средний тип, но нередко случается встретить человека от этого среднего типа какими-нибудь своими свойствами отличающегося. Совершенно то же наблюдается и в мире веществ, где между многочисленными нормальными мы встречаем вещества „удивительные“ и даже „совершенно особенные“. К таким принадлежит, например, радий, грозящий разрушить наши основные взгляды на материю; таковы, вообще, активные элементы, едва рождающиеся и уже прекращающие свое бытие, чтобы уступить место другим формам материи; к ним же принадлежит холестерин со всеми признаками жидкости, но обладающий свойствами твердых кристаллов, таковы сплавы Гейслера, которые, хотя и составлены из немагнитных металлов, обнаруживают сильные магнитные свойства, — и тем

совершенно изменяют наши представления об аддитивности свойств смесей и сплавов.

Среди всех этих тел, отличающихся особенными свойствами, одно может быть поставлено далеко впереди других. Вещество это не столь редко и необыденно, как предыдущие, оно не разделяет с ними ни трудности своего добывания или сохранения, ни трудности запоминания своего названия; вещество, которое, не будь оно столь драгоценным для жизни, должно бы почитаться самым обыкновенным; вещество, знакомое всякому ребенку и встречающееся на поверхности Земли так часто, как никакое другое, и решительно не имеющее по своему значению для нашего существования соперников, за исключением, может-быть, одного. Тело это—вода, та вода, которую люди склонны считать самым нормальным веществом из всего материального, которая у матери-Земли — лучший, но и наименее интересный ребенок, и которая, тем не менее, отличается неправильностями своих важнейших свойств.

Вода, по крайней мере совершенно чистая, не имеет никакого специфического вкуса; в небольшом слое она не имеет цвета, в более значительном, как известно, синевата; она настолько нормальна, что ее сделали носителем научной измерительной системы. И, вместе с тем, она имеет целый ряд до того удивляющих нас свойств, в целом ряде случаев она ведет себя, так значительно уклоняясь от общих правил, что можно с уверенностью сказать: мир, как природы, так и техники, при ее посредстве получает совершенно своеобразную окраску, и только потому мы этого не

сознаем, что мы мира не знаем иначе, чем он есть, считая его в его нынешнем виде мерой всего сущего и происходящего.

Чтобы все это осознать, мы должны начать с самого известного, начать с понятий, имеющих в каждом школьном учебнике и являющихся первыми ступенями той своеобразной лестницы, по которой мы мало-по-малу подыдем до самых замечательных открытий. При этом мы будем говорить о явлениях нормальных и аномальных, и, чтобы запечатлеть эти последние как можно лучше, мы их перечислим, как перечисляют чудеса или смертные грехи: будем говорить о первой, второй и т. д. аномалиях, и если при этом мы дойдем до кабаллистической цифры 7, то этому не следует, конечно, придавать какого-либо особого, мистического значения.

II.

Первая аномалия воды.

Материя, по современному энергетическому воззрению на природу, есть некоторое длительное образование, построенное из энергии; ее мерой для данного тела является масса, количественно определяющая инерцию тела, т.-е. его сопротивление ускорению. Чем больше пространственное распространение самого тела, называемое его объемом, тем больше (и при этом в том же соотношении) и его масса.

Для всякого вещества, совершенно независимо от его размеров, будет характерной масса единицы объема; в качестве такой единицы объема в повседневной жизни считается литр, в науке—кубический сантиметр. Типичной для любого тела, следовательно, является масса одного кубического сантиметра.

Как раз здесь вода является в первый раз нормальным телом: плотность ее не измеряется, т.-е. не сравнивается с плотностью другого тела (ведь всякое измерение есть не что иное, как сравнение), напротив того, с водой сравниваются все другие тела—ее плотность принята по общему соглашению за единицу плотности, и масса одного кубического сантиметра воды названа граммом (gr). Так как один литр содержит 1.000 куб. сант., то за практическую единицу массы принимают 1.000 грамм или 1 килограмм. Этим вопрос был бы исчерпан, так как теоретически понятие массы — чрезвычайно простое понятие, практически же определение массы тела является делом очень трудным.

Действительно, для того, чтобы непосредственно определить сопротивление движению одного кубического сантиметра вещества, пришлось бы преодолеть самые невероятные трудности. Тут приходится окольными путями облегчать себе задачу, пользуясь тем, что при известных условиях рука об руку с массой тела идет другое его свойство — вес тела, хотя, в сущности говоря, последний—нечто совершенно иное, а именно,—давление тела на чашку весов. Поэтому под 1 граммом понимают также и давление, производимое одним кубическим сантиметром воды, или проще — вес

одного куб. сант воды. В этом смысле говорят, что удельный вес воды $= 1$. А удельные веса всех других тел обозначаются числами, которые совпадают с числами „удельной массы“ или плотности, в отношении к плотности воды, как к единице измерений. Соответственно этому в практической системе измерений 1 килограмм является одновременно и единицей массы и единицей веса, связанной с литром.

Выражения: плотность воды равна единице, плотность золота $= 19$, или плотность воздуха $= \frac{1}{800}$, требуют более точного определения. Эти выражения являются правильными только в одном строго определенном случае. И это потому, что, хотя масса данного тела остается всегда неизменной, его пространственные размеры, его объем, отнюдь не всегда сохраняют свою величину.

Объем материального физического тела зависит от целого ряда условий. Главными из них являются давление и температура. Первое влияет на газы в очень сильной степени, на жидкости же лишь незначительно: требуется произвести огромное давление, чтобы заметно сократить объем воды. Наоборот, температура оказывает большое влияние на объем жидкостей, и это влияние не обратное, как в случае давления, а прямое: с увеличением температуры у всех тел увеличивается их объем. Вода также подчиняется этому закону в большей части того температурного промежутка, в котором она сохраняется жидкой; однако, в небольшой области, именно между 0° и 4° С., при возрастании температуры объем воды не увеличивается, а, на-

оборот, сокращается. Это и есть—первая аномалия воды. Она не встречается ни у какого другого тела или вещества, она присуща только и исключительно воде и ее производным: растворам твердых и жидких тел в воде, в которых, однако, аномалия эта постепенно ослабляется по мере увеличения крепости раствора.

Как ни далеко мы зашли в познании явлений природы и условий, при которых эти явления встречаются,—в одном отношении мы подобны детям: нам совершенно неизвестно, почему некоторые роды материи имеют те, а не другие характеризующие их качества. Мы не имеем никакого предположения о том, почему железо можно так сильно намагничивать, а медь почти вовсе не поддается намагничиванию, и совершенно также мы абсолютно не имеем представления о причинах, заставляющих воду сжиматься в температурном промежутке от 0° до 4° С. Ни ее довольно простое химическое строение, ни ее остальные физические свойства не дают нам никакого ключа к объяснению вышеописанного свойства. Здесь мы имеем дело с фактом, голым фактом, и можно сказать—с самым, казалось бы, незначительным и неинтересным фактом, если бы с ним не было связано нечто очень важное, играющее крупную роль в экономике природы на поверхности Земли.

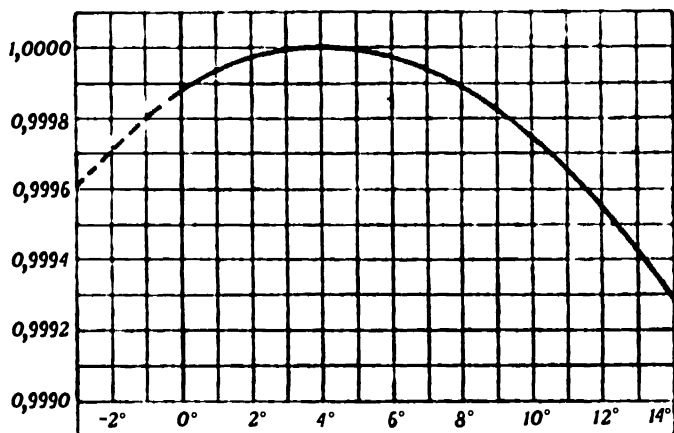
Веди себя вода нормально, все водоемы на Земле, не будь они до некоторой степени охранены от этого внутренней энергией (теплом, живой силой течений и волн),—каждую зиму промерзали бы от поверхности до самого дна, и вся органическая жизнь в них давно бы исчезла. При приближении зимы

поверхностные слои вод, охлаждаясь до 0° , опускались бы на дно, освобождая место другим, более теплым слоям, и так продолжалось бы до тех пор, пока вся масса воды, приобретя температуру в 0° , была бы готова замерзнуть. Но так как наибольшей плотности вода достигает при 4° C, то вышеописанный процесс перемещения слоев имеет место лишь до этой температуры, после чего наиболее охлажденный слой, который благодаря этому легче других,—остается на поверхности и, замерзнув, сохраняет нижележащий слой в жидком состоянии, именно при температуре, заключенной в промежутке между 0° и 4° .

Итак, если нам неизвестна причина аномалии воды, мы зато понимаем ее великое значение; и едва ли мы можем осудить какого-либо философа, если он, под влиянием нашедшего на него телеологического стиха, станет утверждать, что вода приобрела эту аномалию именно для того, чтобы рыбы не погибли. Тут можно сделать и еще шаг вперед, и, основываясь на том, что всякая телеология есть только другая сторона условности (или причинности), построить рассуждение, направленное к тому, чтобы доказать, что в истории Земли только так и могло произойти, если не должно; но мы оставим эту тему без развития, чтобы не заблудиться в лабиринте рассуждений.

Итак, вода имеет наибольшую плотность при 4° C; более холодная, так же как и более теплая, она относительно легче; это как раз и составляет самое интересное в естественно-научном отношении, именно, что зависимость между объемом и температурой не однозначная, как в нормальном случае

было бы, а двузначная: можно найти две разные температуры, например, 3° и 5° , при которых данная масса воды занимает один и тот же объем. На чертеже 1-ом эта зависимость представлена графически; на оси абсцисс (горизонтальное направление) нанесены температуры. на оси ординат



Черт. 1. Зависимость плотности воды от температуры.

(вертикальная ось) отложены плотности. У нормального вещества кривая равномерно падает слева направо *), здесь же, в случае воды, кривая поднимается от 0 до 4° и только отсюда начинает падать.

Теперь, следовательно, определениеграмма должно быть ограничено выбором какой-нибудь определенной температуры, при которой мы измеряем

*) Температура, возрастая, увеличивает объем, т.-е. знаменателя дроби, выражающего плотность, отчего значение дроби уменьшается. *(Прим. пер.).*

массу одного куб. см. воды; эта температура должна быть выбрана близкой к точке наибольшей плотности, не только в виду замечательности этой точки, но и по практическим соображениям: около нее кривая близка к горизонтальной, и маленькая ошибка в определении температуры здесь не окажет большого влияния на результат. Грамм, следовательно, есть масса воды, которая при 4° С занимает объем в 1 куб. см.—Следует добавить, что момент наибольшей плотности воды можно довольно точно определить помощью двух, погруженных в сосуд термометров,—одного, помещенного близко от поверхности, другого — у самого дна; если, при охлаждении этого сосуда с термометрами, температура некоторого слоя воды дошла до 4° С, он, опустившись на дно, заставит данный термометр показывать эту температуру, тогда как верхний будет показывать бо́льшую; и в тот момент, когда на обоих термометрах будет одна и та же температура (это даже и в том случае, если шкалы не точны и не будут стоять на 4°), — вода будет иметь наибольшую плотность.

III.

Внезапное расширение и сжатие.

Область, в которой эта первая аномалия воды проявляется, очень ограничена, именно 4° по термометру Цельсия. Что же происходит при дальнейшем остывании воды, ниже 4° ? На этот вопрос невозможно ответить кратко, так как дело зави-

сит от того, в каком смысле понимать это дальнейшее охлаждение.

Вообще говоря, существует убеждение, что при 0° вода начинает замерзать при всяких обстоятельствах. Фактически же это не так; чтобы самое затвердение наступило, мало одного охлаждения, тут нужно кое-что еще; и только потому, что это добавочное условие и в природе и в обыденной жизни всегда сопровождает охлаждение, и даже более того—от него чрезвычайно трудно освободиться,—замерзание почти всегда имеет место. Этим необходимым добавочным условием—могут быть хотя бы небольшой толчок, едва заметное встряхивание, дуновение ветерка или резкое падение температуры или, наконец, маленькие введенные в воду кусочки льда. Если же постараться избежать всего этого, то можно сохранить воду жидкой при температуре, значительно более низкой, чем 0° ,—воду, как говорят, можно переохладить; в этом состоянии вода должна замерзнуть, но как бы не может,—совершенно так же, как человек в плотно окружающей его толпе, чувствуя себя дурно, должен упасть, но не может. Если исследовать объем переохлажденной воды, то не трудно заметить, что и ниже 0° она продолжает расширяться, и расширение ее продолжается так долго, насколько можно продолжать опыт (всего несколько градусов, так как затем вода все же замерзает); явление это легко проследить по чертежу 1.

Если же дать воде замерзнуть при 0° , то обнаруживается нечто такое, что всегда, где бы оно ни встречалось в природе, дает повод к интереснейшим

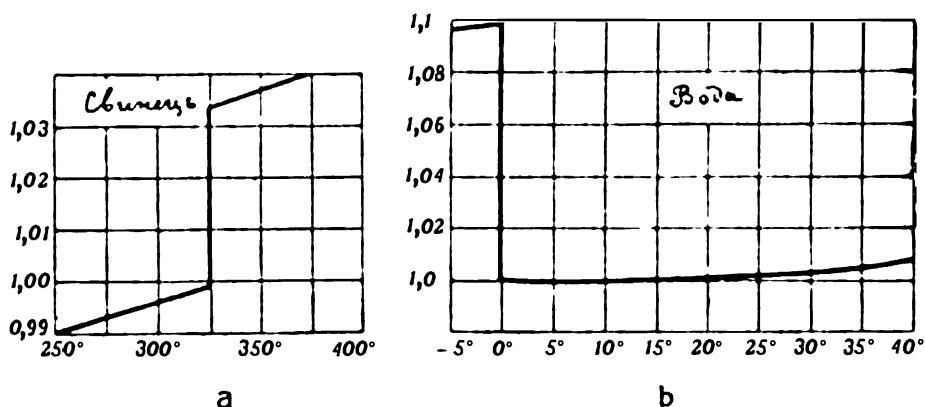
выводам, а именно—п р е р ы в н о с т ь. Объем воды изменяется внезапно в определенном направлении совершенно так же, как он внезапно, скачком изменяется, но в обратном направлении, при таянии льда, около 0° . Здесь мы пришли ко второй аномалии воды.

В то время, как все тела при таянии расширяются, лед, обращаясь в воду, сжимается: вода при 0 относительно тяжелее льда, в противоположность всем другим жидкостям, которые легче соответствующих им твердых тел, — явление, которое никогда так просто и легко не наблюдается, как весной, когда во всех реках начинается ледоход: образующиеся льдины, вместо того, чтобы погружаться (как это имеет место, например, в расплавленном свинце, где твердый свинец погружен в расплавленный), плывут по поверхности вод.

Внезапное расширение, обнаруживаемое водой при замерзании, очень значительно, оно достигает приблизительно 10% всего объема, другими словами удельный объем льда равен 1.1 ; наоборот, плотность его не достигает плотности воды и равна 0.91 . Только очень немногие вещества обнаруживают эту аномалию, например, висмут и некоторые сорта чугуна,—но это случаи исключительные, наблюдающиеся при очень высоких температурах, и потому имеющие совершенно другую природу. На черт. 2 (а и б) даны кривые изменения объема при плавлении для нормального тела и для воды.

То обстоятельство, что все тела при плавлении расширяются,—по атомистической теории вполне и легко объяснимо. Частицы становятся подвижнее, требуют для своего движения больше места

и добывают себе его при помощи сил, развивающихся при столкновениях и приводящих вещество к иному кинетическому равновесию. Как же понимать сжатие воды при плавлении? Здесь остается только одно предположение, именно, что молекулы, из которых построен лед, чрезвычайно объемисты, и при плавлении они переходят в более округленные образования и потому доволь-



Черт. 2. В момент плавления объем свинца быстро увеличивается (от 1,00 до 1,003), объем же воды уменьшается (от 1,1 до 1,0).

ствуются меньшим местом. И этот процесс перестройки не останавливается в момент плавления, но продолжается еще некоторое время; отсюда сжатие воды от 0° и до 4°.

На вопросе, как далеко можно распространить это толкование для объяснения особенностей кристаллического льда, — мы не будем здесь останавливаться, необходимо только указать, что две первые аномалии воды могут вытекать из одного и того же источника. Открытым, конечно

остается вопрос, почему подобная же перестройка частиц не наблюдается если и не у всех, то у многих других тел, следствием чего явилась бы и у них подобная же аномалия, в действительности не наблюдаемая. Пришлось бы сделать особые предположения относительно вида этой перестройки и относительно обстоятельств, при которых результат этой перестройки перевешивает противоположное ей действие при переходе в жидкое состояние настолько, что выступает аномалия. Для таких особых предположений, однако, не хватает достаточно надежных опорных точек, и потому эта вторая аномалия воды, совершенно так же, как и первая, с которой она тесно связана, остается до лучшего будущего — интересной загадкой.

Следует, впрочем, упомянуть, что, как это теперь известно, „вода“ бывает только одна, тогда как „лед“ известен в различных физико-химических состояниях (лед I, лед II и т. д.); поэтому попытки разрешения нашей проблемы во всяком случае не безнадежны.

IV.

Влияние внешнего давления.

Раньше уже упоминалось, что выражение: вода замерзает при 0° , вообще говоря, не вполне правильно (точно), и с явлением переохлаждения мы уже знакомы. Но даже игнорируя это явление, т.-е. считая, что замерзание наступает нормально, было бы недопустимо относить его без всяких ого-

ворок к 0 шкалы Цельсия. Правильно это только при молчаливом предположении, что вода находится при нормальном атмосферном давлении. Легко можно воду подвергнуть уменьшенному давлению и даже вовсе освободить от давления (вполне, конечно, только теоретически, а практически не совсем), поместив в сосуд с соответствующими приспособлениями и откачав воздух; с другой стороны возможно в наполненном водою сосуде, путем ввинчивания находящегося в его крышке поршня, создать значительное давление в 2, 5, 20 и даже 100 атмосфер (необходимо только, чтобы стенки сосуда выдержали такое громадное давление). Если теперь такой сосуд, наполненный водой, опустить в охлаждающую смесь с температурой на несколько градусов ниже нуля, то вода не обратится в лед, как того можно было бы ожидать, а останется жидкой. Правда, при такой постановке опыта явление невозможно наблюдать, ибо, встряхивая сосуд, услышать всплескивание воды (и тем определить, замерзла она или нет),—совершенно невозможно по той причине, что в наполненном сосуде нет свободного пространства, и вода не может плескаться. Увидеть же, вода ли в сосуде или лед,—тоже невозможно, так как, по вскрытии сосуда, давление в нем становится нормальным, и наблюдатель найдет в нем плотную массу льда. Наиболее простое из возможных ухищрений, направленных к разъяснению загадки, заключается в том, чтобы перед закрытием сосуда опустить на его дно какую-либо монету. Установив затем высокое давление и охладив сосуд, переворачивают его вверх дном, отчего монета перекидывается, и по вскрытии сосуда, когда вода от этого

быстро замерзнет, монета оказывается ближайшей к крышке: доказательство, что вода и при низкой температуре оставалась жидкой. Итак, точка заморзання воды с увеличением давления понижается и, как показали точные исследования, увеличению давления соответствует небольшое, но вполне определенное понижение точки заморзання. Так, увеличению давления на 1 атмосферу соответствует понижение точки заморзання всего на $\frac{3}{400}$ градуса (приблизительно); при давлении в 130 атмосфер точка заморзання понижается на 1° , а при 500 А уже на 4° . В дальнейшем нас не будут интересовать эти цифры, они дают только чрезвычайно важное представление о направлении явления, ибо в этом-то и заключается третья аномалия воды.

Если человеку, способному логически мыслить, но незнакомому с предметом, задать вопрос, что должно произойти, если охлаждать жидкость под ббльшим давлением, он ответит: „жидкость заморзнет легче, давление способствует заморзанию“. Это именно и наблюдается для многих веществ, например, воска, параффина и других, у воды же, как раз наоборот, давление затрудняет затвердевание, отодвигает его, оно способствует постоянству и сохранению жидкого состояния. На первый взгляд мы встали здесь перед новой загадкой; но при ближайшем рассмотрении необходимо вспомнить, что вода совершенно аномально при заморзании не сжимается, а, наоборот, расширяется, чему, естественно, противодействует сильное внешнее давление, отодвигающее точку заморзання, которая вследствие этого понижается. Итак, загадочность явления

исчезла—оно является необходимым следствием уже известного; и мы догадываемся об одной общей причине всех описанных аномалий, хотя и не можем вполне точно ее формулировать.

Эта третья аномалия играет значительную роль в природе. Температура поверхностного слоя воды в океанах колеблется в незначительных пределах, летом она только немного теплее, чем зимой; смены дня и ночи также не дают большой разницы в температуре,—что происходит от большой массы воды и ее легкоподвижности.

При погружении в глубь моря мы быстро приходим к довольно низкой и постоянной температуре, которая, по последним измерениям, на больших глубинах держится около 3° ниже нуля. И тем не менее вода на этих глубинах находится в жидком состоянии благодаря чудовищному давлению, которое легко себе представить, если припомнить, что слой воды уже в 10 метров производит давление в одну атмосферу. Не трудно вообразить, какому изменению подвергся бы весь облик Земли, если бы вода вела себя нормально и легче замерзала бы при высоком давлении, чем при нормальном.

V.

Теплоемкость.

Теперь мы переходим к совершенно новому виду особенностей воды, которые, в противоположность уже описанным, можно назвать скорее механическими, чем энергетическими.

Если мы наблюдаем, что температура некоторого тела меняется без совершения работы, то мы говорим, что телу сообщается или отнимается теплота, и эту теплоту мы рассматриваем, как некоторый вид энергии. При этом мы находим, что у разных веществ существует совершенно различное взаимоотношение между повышением температуры и количеством притекающего тепла, т.е. между совершенно независимыми друг от друга величинами: одна из них измеряется термометром, другая—калориметром. Одно тело требует для повышения температуры на 1° —большого притока тепла, другое ограничивается малым количеством. Тепло, потребное на то, чтобы нагреть тело на 1° , называется теплоемкостью тела, а если притом речь идет об одном грамме вещества, то в этом случае теплоемкость называется удельною теплоемкостью данного тела; на практике вместо грамма берут килограмм. Эта удельная теплоемкость у одних тел велика, у других мала, и должна естественно быть выражаема в каких-нибудь единицах, теплоемкость какого-нибудь тела должна быть принята за единицу, и выбор пал, как и при определении единицы удельного веса, на воду. Итак, удельная теплота воды принята равной единице, и теплота других тел выражается ее кратными или дробными. Тут опять обнаруживается нечто удивительное, однако не имеющее характера аномалии: речь идет скорее о крайне выделяющем среди других тел положении воды. Среди почти всех тел, теплоемкость которых колеблется незначительно, вода обладает наибольшей удельной теплоемкостью; и только немногие вещества приближаются к ней, из них однако

ближайшие обладают теплоемкостью в 5, 10, 20 и 30 раз меньшею, чем вода. Это, как известно, является особенностью последней, с которой часто приходится сталкиваться как в технике, так и в обыденной жизни, иной раз с выгодой, другой с ущербом, а во многих случаях—с тем и другим одновременно. В виде примера упомянем водяное отопление, чрезвычайно медленно нагреваемое в силу большой теплоемкости воды, но раз нагретое, долго сохраняющее тепло. Что же касается варки пищи, то, располагай мы для этой цели несколькими однородными жидкостями, мы несомненно выбрали бы не воду, которая для своего нагревания требует больше всего времени, больше всего энергии и обходится, следовательно, всего дороже.

Почему именно вода обладает наибольшей теплоемкостью,—мы не можем составить себе более или менее удовлетворительного представления; рассуждения, исходящие из строения молекулы воды, состоящей, как известно, из двух атомов водорода и одного кислорода,—не приводят к цели; предположение, что тут снова имеет место перестройка частиц,—слишком шатко, чтобы иметь какое-нибудь научное значение.

Как уже сказано, большая удельная теплоемкость воды не может быть рассматриваема, как аномалия. Что, однако, тут действительно аномально, так это ход изменения теплоемкости воды при изменении температуры. До сих пор мы пользовались таким определением: „удельная теплоемкость есть количество теплоты, потребное для нагревания 1 грамма вещества на 1° “; при этом молчаливо предполагалось, что совершенно безразлично, происходит ли

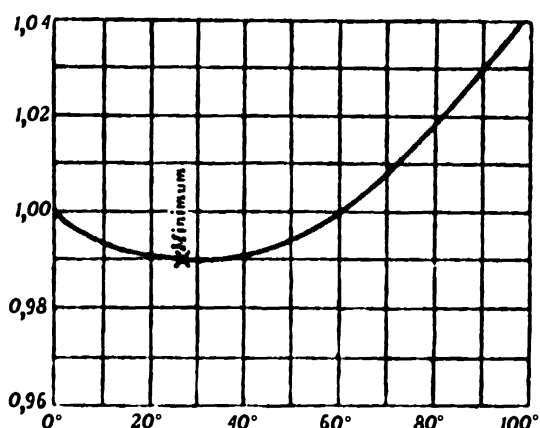
повышение температуры от 0° до 1° или от 15° до 16° (комнатная температура) или в каком-либо другом температурном интервале. Однако, это ни в коем случае не так: теплоемкость у всех тел не неизменна, а часто значительно меняется, и, не считая двух исключений,—с поднятием температуры возрастает и теплоемкость. Эти два исключения представляют ртуть и вода. В то время, как у ртути явление это чрезвычайно просто, а именно—с возрастанием температуры теплоемкость падает, у воды оно много сложнее, и это явление—четвертая аномалия воды. Ее удельная теплоемкость от 0° и приблизительно до 27° постепенно падает, достигает здесь своего *minimum'a* и отсюда начинает возрастать. Правда, изменение теплоемкости воды не так уж значительно, тем не менее оно ясно выступает и поддается точному учету.

Это обстоятельство значительно усложнило весьма важную в практическом отношении задачу установления истинной единицы удельной теплоемкости, т.-е. „калории“. Для этого можно было бы взять количество теплоты, потребное для нагревания 1 гр. воды от 0° до 1° или от 15° до 16° , но эти количества можно определить только косвенным путем, потому что в таком маленьком температурном интервале невозможно сделать непосредственные точные измерения. Лучше всего взять весь интервал от 0° до 100° , в котором при нормальных условиях вода остается жидкой, и полученное измерением количество теплоты, деленное на 100, даст среднюю теплоемкость в этом интервале; впрочем, совсем недавно выяснилось, что полученная таким путем удельная теплоемкость очень мало отличается

от теплоемкости при комнатной температуре, и потому, согласно международному соглашению, принята за единицу количества теплоты—калорию.

На черт. 3 представлена кривая удельной теплоемкости воды между 0° и 100° , при чем масштаб оси ординат выбран очень большим, чтобы разности выступали достаточно отчетливо.

Что же это за новая особенность воды, выделяющая ее среди других веществ? Сравнивая эту аномалию с прежней, с максимумом плотности, т.-е.



Черт. 3. Зависимость теплоемкости воды от температуры.

минимумом удельного объема, видим, что тот минимум наступает при 4° , этот — при 27° ; становится все ясней и ясней, что идея перегруппировки атомов, как основа для объяснений всех аномалий воды, должна быть основательно изучена, а соответствующая теория должна, по всей вероятности, приобрести очень сложный вид, чтобы объяснить

многообразие аномалий воды. В дальнейшем мы будем еще иметь случай вернуться к этому вопросу.

Раньше уже упоминалось, что удельная теплоемкость воды ненормально велика по сравнению с другими телами. Но имеется вещество, которое, повидимому, из этого сопоставления должно быть изъято, так как стоит ближе всего к воде, вернее сказать, так как оно—тоже вода, только в другом состоянии, — именно лед. Однако, это не совсем верно. И лед имеет значительно меньшую теплоемкость, чем вода, именно немного больше, чем в половину. Тем же самым притоком энергии, которым нагревается на 1° один грамм воды, можно нагреть два гр. льда. И это имеет место и в том случае, когда оба тела—и 1 гр. воды и 1 гр. льда имеют одну и ту же начальную температуру, напр., 0° и одну и ту же конечную температуру, напр., 1° . Так велика разница в поведении при таком близком родстве состояний!

VI.

Теплота плавления.

Теперь перекинем энергетический мостик между обеими формами материи, между льдом и водой!

Само собою разумеется, что, если для нагревания тела при неизменности его агрегатного состояния требуется приток тепла, то этот приток еще более необходим для изменения его состояния, если даже температура тела не изменяется (что имеет место при нормальных условиях): термометр,

погруженный, напр., в смесь воды и льда, стоит на 0° все время, пока нагревающий смесь огонь не расплавит последнего кусочка льда. Количество тепла, которое необходимо затратить на плавление 1 гр. льда, называется теплотой плавления льда или, если употребляют выражение „вода“ для ее обоих состояний, говорят: „теплота плавления воды“. Другое выражение для того же понятия: „скрытая теплота плавления воды“; здесь взято в основу наблюдение, что необходимая для плавления теплота исчезает внутри делающегося жидким льда, не проявляясь наружно в повышении температуры. Нельзя сказать, чтобы это выражение было выбрано особенно удачно, так как энергетическое различие между льдом и водой бросается в глаза по крайней мере не меньше, чем различие между холодной и теплой водой, о скрытости поэтому и речи, собственно говоря, не может быть, иначе придется говорить о скрытой теплоте горячей воды, хотя здесь она и обнаруживается термометром. Выражение „скрытая теплота“ на наших глазах становится устарелым; во всяком случае ему необходимо предпочесть термин „теплота плавления“.

Тут мы подходим ко второму случаю, когда вода, хотя и не обнаруживает никакой аномалии, но тем не менее занимает особое место среди других тел. Вода обладает необыкновенно большой теплотой плавления; не менее 80 калорий необходимо затратить, чтобы расплавить лед, — 80 грамм-калорий на 1 гр. льда, иначе говоря: чтобы расплавить 1 гр. льда, необходимо затратить столько же энергии, сколько ее нужно было бы для нагревания 80 гр. воды на 1° или 1 гр. воды на 80° !

В нашем случае процесс плавления равноценен (эквивалентен) нагреванию на 80° ! Выражаясь еще иначе: лед при 0° и вода при 0° по содержанию скрытой энергии так же сильно отличны друг от друга, как вода при 0° и вода при 80° . Для сравнения укажем, что теплота плавления бензола—30, свинца 5,5, серы 9,5, чистого железа 6 калорий. Из металлов только один обладает колоссальной теплотой плавления—аллюминий, свойство, получившее огромное техническое применение. За следствиями, которые вытекают из большой теплоты плавления воды,—недалеко ходить. Если уже при существующих условиях слышны жалобы, что употребляемый в хозяйстве лед так быстро тает, то насколько было бы труднее, если бы вода имела нормальную теплоту плавления! В природе же тепловая инерция воды (так можно назвать рассматриваемое здесь свойство воды в связи с необыкновенно большой ее удельной теплоемкостью) кладет свой отпечаток на все явления, наблюдаемые в морях, реках, глетчерах и снежных полях, отпечаток, который трудно описать вкратце, но который понемногу выяснится в дальнейшем.

Теплота плавления также не принадлежит к величинам, которые при всяких обстоятельствах характеризуются одними и теми же числами; она принимает различные значения в зависимости от того, происходит ли плавление при 0° или при другой температуре (что м. б. при измененном давлении или при других обстоятельствах). При 7° ниже нуля, например, теплота плавления достигает только 76 калорий, т. е. с каждым градусом понижения она уменьшается чуть не на пол-калории. Этот

факт, взятый сам по себе, находится в противоречии со всеми ожиданиями. Ибо, чем холоднее лед, тем сильнее, как можно было бы предполагать, его сопротивление таянию; на самом деле—как раз наоборот, и это—пятая аномалия воды. Легко видеть, что эта аномалия находится в логической связи с тем обстоятельством, что удельная теплоемкость льда меньше, чем воды. Нас слишком далеко завело бы дальнейшее развитие этой связи; термодинамика дает для нее простую формулу, легко и просто объясняющую это свойство воды. Следует упомянуть, что этой же аномалией обладают еще два или три вещества—многие тела вообще точно не исследованы с этой точки зрения—между ними, например, фосфор.

VII.

Теплота парообразования.

Если теплота плавления воды отличается своим необыкновенным размером, то в еще большей степени обращает на себя внимание родственная ей величина, которая, однако, переносит нас совершенно в другую область, именно в область перехода из твердого и жидкого состояния в газообразное,—в водяной пар.

Как для обращения льда в воду, так, естественно, и для превращения воды в пар необходимо затратить некоторое количество энергии, которую, измеряемую калориями, называют теплотой паро-

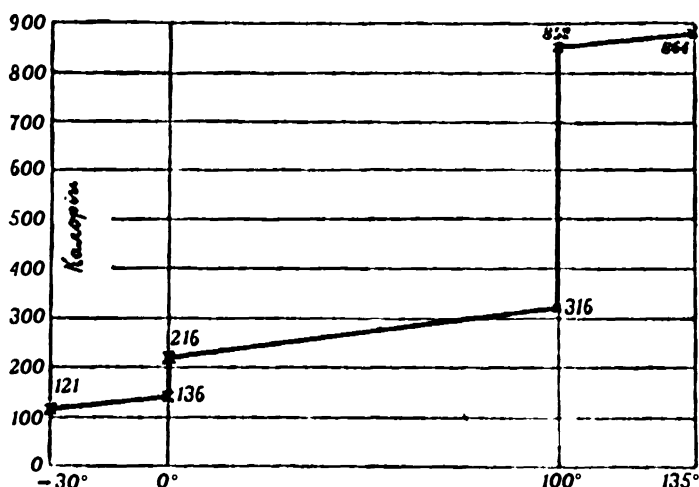
образования (или скрытой теплотой парообразования) и которая значительно превосходит первую.

Не меньше 536 калорий необходимо сообщить единице массы воды, чтобы обратить ее в пар; вот уже третья особенность воды, возносящая ее среди других веществ на царственную высоту! И тут мы не вполне можем понять причину этого явления. Ни химическое строение, ни физическое свойство воды не дают ключа к объяснению причины такого большого сопротивления воды внешнему усилию, направленному к тому, чтобы привести ее частицы из присущего жидкому состоянию тесного сцепления в более разъединенное, с сильным, беспорядочным движением, соответствующим, с точки зрения атомистической теории, газообразному состоянию материи.

Каковы практические последствия этого, мы уже упоминали: чрезвычайная неэкономичность получения высоких температур при помощи воды, которую—будь на то возможность—следовало бы заменить другой жидкостью. Итак—к большой теплоте плавления, такой же удельной теплоемкости, присоединяется огромная теплота испарения. Необходима гигантская затрата тепла, чтобы обратить 100-градусную воду в 100-градусный пар; нужно только припомнить, что то же самое количество алкоголя обращается в пар одной третью, а ртуть— $\frac{1}{8}$ той энергии, которая потребна для воды. Сопоставляя все три описанные особенности воды, мы получим представление о той огромной внутренней энергии, которая скрыта в водяном паре.

На чертеже 4-ом изображена вся энергетическая история воды, от холодного льда до самого

горячего пара. Абсциссы представляют температуры, а ординаты — калории, заключающиеся в веществе при соответствующих температурах. Кривая состоит из двух резких вертикальных подъемов, при 0° и 100° и трех медленно поднимающихся частей, соответствующих нагреванию льда, воды и пара; из этих отрезков — самый крутой соответствует жидкому состоянию, так как теплоемкость здесь равна единице; менее круты обе другие ветви кривой, так



Черт. 4. Внутренняя энергия (в калориях) льда, воды и пара.

как теплоемкость льда и пара равна соответственно $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{3}$. Нетрудно видеть, если мысленно продолжить кривую, что около 500° пар содержит не менее 1000 калорий.

Теперь мы не будем удивляться тому, что водяной пар в такой степени пригоден в качестве источника силы для неподвижных и движущихся ма-

шин—утверждение, которое, естественно, не устанавливает степени экономичности паровых машин: если много вложено, много и получится. Впрочем, в этом случае получается сравнительно мало, таким образом коэффициент полезного действия относительно невелик. Причину этого явления мы должны подвергнуть особому рассмотрению, которое, хотя и не ведет к новой аномалии воды, но от этого не становится менее интересным.

На основании принципа сохранения энергии, при каждом процессе, будь он естественный или технический, энергия не приобретается и не теряется, происходит только преобразование энергии из одной ее формы в другую; в нашем случае тепло обращается в механическую работу. Если измерить оба вида энергии в одних и тех же единицах, то получатся одинаковые числа; если измерять теплоту в грамм-калориях, а работу в эргах, то мы получим соотношение между двумя единицами, а именно каждой грам-калории соответствуют 42 миллиона эргов. Но уже грубые измерения, произведенные на паровых машинах, показывают, что энергия, получаемая маховым колесом, даже приблизительно не равна этой величине: она составляет $\frac{1}{6}$ или $\frac{1}{5}$, у современных машин, может-быть, $\frac{1}{4}$ той энергии, которую можно бы ожидать согласно принципу сохранения энергии. Естественно, что часть сообщенной машине энергии при прохождении ее через машину теряется благодаря трению, излучению, теплопроводности и другими путями: вернее сказать, часть сообщенной энергии рассеивается в частях машины и в пространстве. Однако, легко показать, что эта „утечка“ далеко не так велика, как

полная потеря энергии; и теоретически с полной уверенностью можно доказать, что даже у машины, у которой совершенно исключены вышеупомянутые, так называемые, необратимые процессы, (что практически, конечно, неосуществимо), т.-е. у машины, которая работает вполне обратимо, получаемая работа может составлять только небольшую часть сообщенной энергии. Можно даже совершенно точно сказать, как велика должна быть эта часть, иначе называемая полезным действием машины. Эта величина не зависит от устройства машины, а лишь от двух факторов: температуры котла, которым питается машина, и от температуры холодильника или конденсатора, пользование которым необходимо и который служит для отвода и конденсации пара (у локомотивов, например, конденсатором служит атмосфера).

Станем обе названные температуры отсчитывать не от точки замерзания воды, но от точки, которая лежит на 273 градуса Цельсия ниже нуля и носит название „абсолютного нуля“ температуры, (так как более низкой температуры нельзя получить). Во-вторых, мы будем в дальнейшем рассматривать не полезное действие машины, т.-е. отношение полученной энергии к энергии затраченной, а направим свое внимание на энергию теплой воды, отводимой в конденсатор, и будем называть степенью рассеяния машины отношение этой потерянной для машины энергии к первоначальной, имея в виду то обстоятельство, что эта энергия, рассеиваемая в окружающее пространство, остается бесполезной для машины.

Численное значение степени рассеяния для обра-



Лорд В. Кельвин (В. Томсон
(1824 — 1907).

тимой тепловой машины на основании установленных 60 лет тому назад и остающихся неизменными до сих пор положений учения о теплоте (термодинамики) равно отношению абсолютных температур конденсатора и котла. Совершенно ясно, что если

мы знаем эту величину, то мы легко можем вычислить полезное действие машины, т.-е. ту величину, которая в конце концов нас интересует: оно просто равно дополнению до единицы той правильной дроби, которая представляет степень рассеяния. Чтобы получить наиболее экономно действующую машину, необходимо возможно увеличивать полезное действие, следовательно возможно уменьшать степень рассеяния; этого можно достигнуть двумя способами: или тем, что температуру котла (число входящее в знаменатель) поддерживают возможно выше, или возможно большим охлаждением конденсатора (уменьшение знаменателя). Обе эти возможности, как легко понять, по крайней мере пока в машине употребляется вода, осуществимы лишь в узких пределах. Нормальная температура котла 100° , т. е. 373° Кельвина (как называют абсолютную температуру в память великого английского физика лорда Кельвина); с другой стороны конденсатор, в который устремляются конденсирующиеся пары, в лучшем случае имеет температуру в 50° , т.-е. 323° Кельвина; степень рассеяния следовательно равна $\frac{323}{373}$, т.-е. 0,86 или 86 процентов, и следовательно для полезного действия остается только 14%. Существуют возможности несколько увеличить разницу обеих температур; можно, например, подвергнуть котел высокому давлению, отчего, как мы увидим, температура кипения повышается; однако технически довести ее выше $150^{\circ} C$ или $423^{\circ} K$ не удастся. Конденсатор помощью особых приспособлений можно охладить до $20^{\circ} C$ т.-е. $292^{\circ} K$. Тогда степень рассеяния будет в круглых числах 70% и

полезное действие 30%; отсюда надо еще отнять потери, вызываемые побочными необратимыми процессами (трения и т. д.), так что в лучшем случае остается 25 процентов, т.-е. полезной оказывается только одна четверть всей применяемой энергии. При употреблении некоторых других жидкостей можно получить лучшие результаты, но выгода не столь велика, а очевидно возникающие при этом неудобства слишком велики для того, чтобы открывать большое поле для технических усовершенствований.

Теперь становится ясным, почему так необыкновенно мало полезное действие колорической и главным образом паровой машины: причина этого явления заключается в слишком малом интервале между границами существования воды, т.-е. между точками таяния льда и кипения воды: на протяжении 273° вода тверда; с другой стороны, даже если считать вверх только до $1.000^{\circ} C$, в пределах 627° вода парообразна, и только в маленьком интервале в 100° вода находится в жидком состоянии. В связи с этим конденсатор и котел по своим температурам очень близки, для использования всей энергии не хватает нужного тут резкого контраста. Этот контраст был бы налицо, живи мы на поверхности Земли при более низких температурных условиях (предполагая, конечно, что наш организм были бы соответственно иначе устроен); лежи, например, точка кипения воды и таяния льда при 200 и 500 градусах абсолютной шкалы, то степень рассеяния равнялась бы $\frac{1}{4}$, а полезное действие было бы $\frac{3}{4}$, т.-е. 75 процентов. В совершенно

другой области использования энергии, именно в электрических машинах, мы имеем очень высокое полезное действие (90% и выше), — так что электрическую энергию можно использовать почти целиком; и это только по той причине, что мы живем на довольно низком, мало отличающемся от нуля уровне электрического потенциала, тогда как температурный уровень у нас довольно высок.

VIII.

Водяной пар.

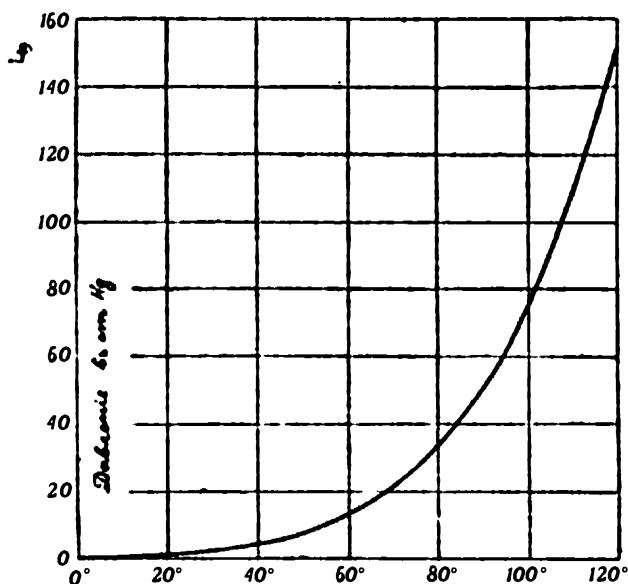
Возвращаясь от техники к науке, несколько остановимся на том факте, что вода кипит при 100°C . Ясно, что эта температура относится только к особым, хотя, может-быть, и наиболее часто встречающимся условиям. Если уж точка таяния льда изменяется от давления, то нельзя сомневаться, что и с точкой кипения воды будет происходить то же, если еще не в большей степени. В действительности первая изменяемость может быть названа микроскопической, эта — макроскопической. Относительно направления, в котором второе изменение протекает, тоже не может быть сомнения, всякая аномалия здесь исключена; чем меньше давление, тем легче, т.-е. при тем более низкой температуре происходит кипение, и наоборот. Спокойное испарение воды имеет место постоянно, при всякой температуре, но только с поверхности; если привести всю массу воды в состояние кипения, то внутренняя ее энергия при этом настолько возрастает, что она в

состоянии преодолевать внешнее давление. Если внешнее давление, вместо одной атмосферы, не превышает половины, то вода уже кипит при 82° ; наоборот, при двух атмосферах давления вода закипает только около 120° . Эти явления можно наблюдать или в лаборатории при помощи разрезающего или нагнетательного насоса, или, — конечно, в более узких пределах, — непосредственно в природе, на высоких горах или в глубоких шахтах. На самой высокой горе Земли (вершина которой еще недостигнута) вода должна кипеть уже при 71° , а на высотах, достигнутых при воздушных полетах, еще раньше; на дне глубокой буровой скважины вода будет кипеть при 110° и даже 120° .

Рассматриваемое здесь явление можно представить иначе, так сказать, в обращенной форме. Если наблюдать кипение в открытом сосуде, то конец процесса естественно совпадает с исчезновением воды. В закрытом же сосуде наступит равновесие между жидкостью и образовавшимся паром, как только последнего получится такое количество, которое задержит дальнейшее парообразование. В этом случае говорят: пар насыщен (вернее было бы сказать — пространство насыщено паром). Конечно, это справедливо только для определенной температуры; для другой — давление насыщенного пара или, как говорят, упругость насыщающего пара будет другая. Короче: упругость насыщающего пара есть функция температуры. Таким образом получилась обратная форма прежнего положения: точка кипения — функция давления.

Неисчислимо число раз со все возрастающей точностью измерялась упругость насыщающего пара

воды как функция температуры, и были получены соответствующие таблицы; но еще нагляднее графическое изображение этой зависимости в виде кривой упругости насыщающего пара на черт. 5. Как видно, упругость пара, начиная от 1° , увеличивается сначала медленно, и кривая долго остается очень полой; но понемногу упругость насыщающего пара возрастает все быстрее и быстрее и,



Черт. 5. Давление водяного пара над поверхностью воды в зависимости от температуры.

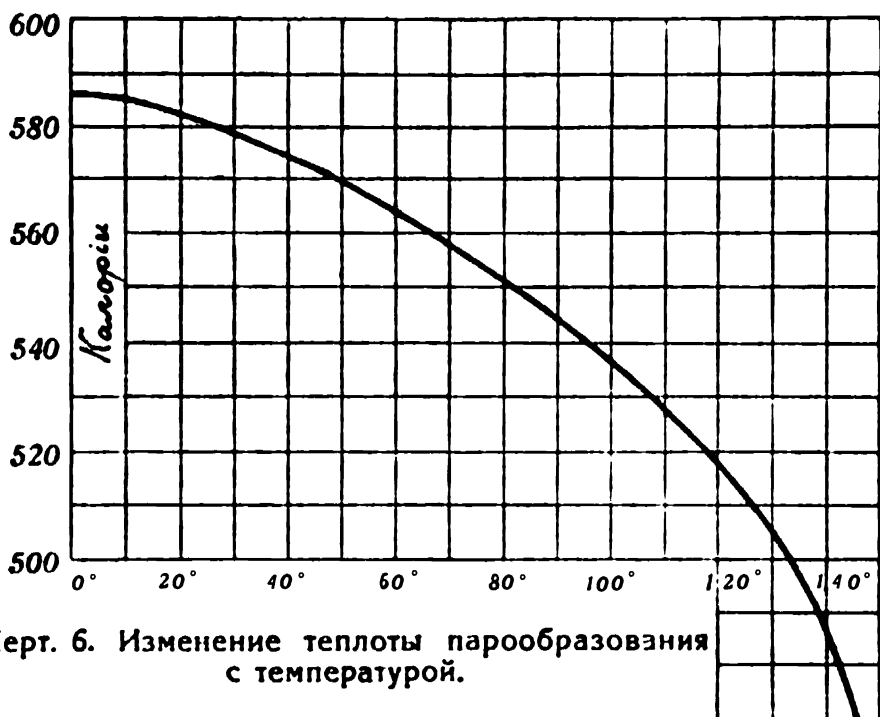
наконец, приобретает огромное значение. Это и является причиной, почему, как об этом уже говорилось, перегревание котла допустимо лишь в узких пределах; при мало-мальски значительном перегревании давление становится настолько большим, что никакие стенки котла не выдержат.

В противоположность многим аномалиям воды, кривая упругости насыщающего пара воды не представляет ничего особенного; эта кривая очень похожа на кривые других паров,—только другие кривые иначе расположены относительно осей переменных—температуры и давления (абсциссы и ординаты); хотя и эту разницу можно устранить, и все кривые в своих главных частях будут совпадать. Для этого нужно только температуру и давление измерять не градусами Цельсия и высотой ртутного столба, а долями или кратными величин, которые носят название „критическая температура“ и „критическое давление“. Здесь лишь коротко заметим, что на этот раз в виде исключения вода ведет себя очень мало интересно.

Критическая температура,—это такая температура, при которой исчезает разница между жидким и газообразным состоянием вещества, и при которой газ ни при каком давлении не обращается в жидкость, так как при этой температуре жидкость, в противоположность „газу“ или „пару“, не может существовать. Углекислота и другие вещества дают возможность легко изучать это явление, гораздо труднее—у воды, критическая температура которой очень высока; во всей доступной нам области вода ведет себя в этом отношении нормально: она может быть и жидкой и газообразной.

Но тут можно сделать одно важное замечание. Изображенная на черт. 5 кривая представляет давление паров воды над ее поверхностью. Такие кривые можно начертить и для других случаев, особенно для двух: во-первых, для давления пара над льдом и, во-вторых, над водными растворами.

В обоих случаях получим кривые, лежащие внутри изображенной: для какой-нибудь данной температуры давление паров в обоих случаях меньше, чем для чистой воды. В этом смысле говорят о понижении давления, и тут можно сделать целый ряд интересных наблюдений, о которых здесь, однако, не будем распространяться.



Черт. 6. Изменение теплоты парообразования с температурой.

Ранее, чем пойти дальше, вернемся несколько к теплоте парообразования. Выше было указано, что вода обладает большой теплотой парообразования, в 536 калорий; не надо и подчеркивать, что по аналогии с теплотой плавления, это число не имеет какого-либо всеобщего значения и отно-

сится лишь к парообразованию при 100° . Если же парообразование происходит при другой, более высокой или более низкой температуре или при отличающемся от нормального давлении, то изменяются и другие условия. В частности выясняется, что теплота парообразования так же, как и теплота плавления, является функцией температуры; но зависимость эта здесь противоположна той: здесь она вполне нормальна. Следовало ожидать, что чем холоднее жидкость, тем больше нужен приток тепла, чтобы обратить ее в пар; чем она теплее, — тем меньше, и это ожидание вполне оправдывается на воде. При 0° теплота парообразования 587, при 50° только 568, при 100° , как мы знаем, 536, и при 150° еще меньше—446. Из этих чисел, а еще лучше из чертежа 6, видно, что теплота парообразования падает с повышением температуры; и ясно, что при некоторой температуре она упадет до нуля, именно,—при критической температуре, при которой парообразования больше фактически нет, и оно, следовательно, не может быть связано с поглощением энергии.

IX.

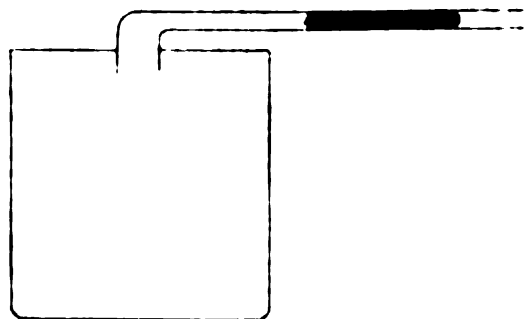
Две теплоемкости.

Теперь мы подходим к шестой аномалии воды,—последней в рассматриваемой до сих пор области явлений. В некотором отношении это аномалия самая замечательная, и она-то и дала первоначальную идею этой работы: ибо слишком велик контраст

между ее огромным значением и тем ничтожным вниманием, которое ей уделяется в научной и популярно-научной литературе. Но чтобы ее понять, необходимо некоторое отступление.

Раньше мы говорили об удельной теплоемкости воды и между прочим упоминали, что теплоемкость жидкого ее состояния отличается от теплоемкости состояний как твердого, так и газообразного. Теплоемкость последнего была затронута лишь вскользь, и теперь на ней надлежит остановиться подробнее. О теплоемкости паров в собственном смысле этого термина нельзя и говорить, не установивши тех условий, при которых происходит нагревание пара. И в этом отношении имеются две возможности. Либо определенное количество паров вводят в замкнутый сосуд, в котором он принимает совершенно определенную температуру и давление, сообщают сосуду некоторое измеренное количество тепла и наблюдают повышение температуры (следствием чего является и повышенное давление, которое нас, однако, здесь не интересует) и делят первую величину на последнюю; частное и будет теплоемкостью водяного пара. Либо употребляют сосуд, изображенный на черт. 7, связанный с трубкой, закрытой каплей ртути, которая, при сообщении заключенному в сосуде газу некоторого количества тепла, передвигается и сохраняет внутри сосуда постоянное давление, равное давлению атмосферы, в то время как температура и объем тела изменяются; здесь так же можно определить теплоемкость пара. И вот находят (конечно, несколько обходным путем, так как первый из описанных опытов в этом виде трудно исполним), что удельная теплоемкость

во втором случае значительно больше, чем в первом. Это открытие не должно нас удивить, ибо в первом случае сообщенная пару энергия вся ушла на повышение температуры, в то время как во втором случае часть ее ушла на расширение паров, т.-е. на преодоление сопротивляющегося этому расширению внешнего давления. Итак, можно утверждать, что теплоемкость при постоянном да-



Черт. 7. Сосуд, закрытый каплей ртути, которая, перемещаясь, поддерживает внутри сосуда постоянное давление, равное внешнему.

влении больше, чем теплоемкость при постоянном объеме. Естественно, что это имеет место не только для газов, но и для твердых и жидких тел, и потому раньше, чем мы рассмотрим это явление в приложении к газам, сделаем маленькое, обещанное выше, дополнение о теплоемкости жидкой воды. Когда говорят о теплоемкости жидкого или твердого тела, то имеют в виду теплоемкость при постоянном давлении, ибо только последняя и поддается непосредственному определению. Однако, из нее можно вычислить теплоемкость при постоянном объеме

и найти разность δ и отношение χ . При этом обнаруживается, что этой разницей совсем нельзя пренебрегать, как нередко это делают, потому что для многих тел она принимает значительные величины; у ртути, например, она достигает 20 процентов. У воды же обнаруживается нечто чрезвычайно интересное: при 4° обе теплоемкости одинаковы; чем выше температура, тем больше разница; начертив обе кривые, легко видеть, что теплоемкость при постоянном давлении имеет минимум при 27° , как это было ясно из черт. 3, тогда как теплоемкость при постоянном объеме такого минимума не обнаруживает, а при повышении температуры правильно убывает. На черт. 8 эти кривые представлены для сравнения: кривая для C_p (теплоемкость при постоянном давлении), кривая для C_v (теплоемкость при постоянном объеме), кривая для разности δ и кривая для отношения χ . Отсюда видно, что аномальна, собственно говоря, не теплоемкость воды, как мы говорили выше, а работа, совершаемая при нагревании; конечно, этим несколько не разъясняется причина аномалии.

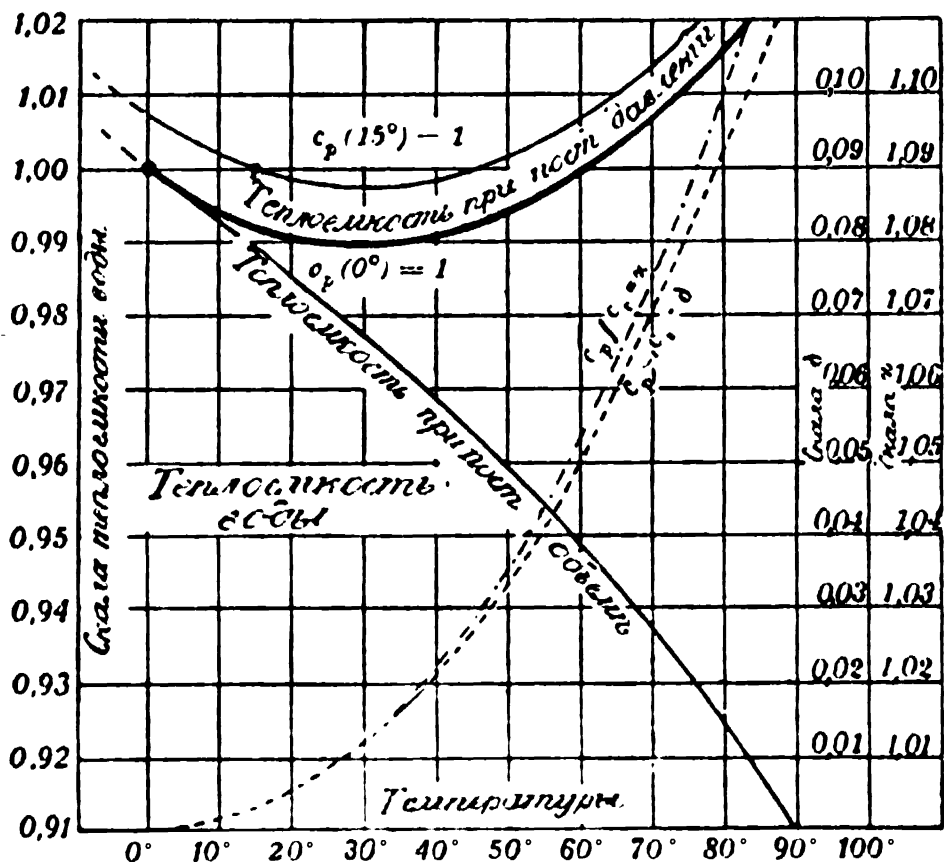
Перейдем теперь к газам, которые, как известно, очень сильно изменяют свой объем с температурой.

Чтобы представить это явление возможно нагляднее, образуем дробь, содержащую в числителе величину теплоемкости при постоянном давлении, в знаменателе—при постоянном объеме, и назовем эту дробь отношением теплоемкостей. Для паров

воды это отношение близко к $\frac{4}{5}$, т.-е. теплоемкость

при постоянном давлении примерно на $\frac{1}{4}$ больше

теплоемкости при постоянном объеме; и эта четверть, следовательно, расходуется на работу преодоления внешнего давления. Что касается вели-



Черт. 8. Кривые теплоемкостей при постоянном объеме (C_v) постоянном давлении (C_p), их отношения (χ) и разность δ

чины самой теплоемкости, то, как можно уже было видеть из черт. 4, она для водяных паров около $\frac{1}{3}$ или точнее—0,35, откуда для теплоемкости при по-

стоянном давлении получается величина 0,44. Водяные пары, следовательно, от 2 до 3 раз легче дают себя нагреть, чем вода, конечно, если речь идет об одном и том же количестве, например, одном грамме, объем которого в случае пара естественно значительно больше объема грамма жидкости.

Тут мы затронули один пункт, которого надлежало коснуться раньше; рассмотрим его теперь и будем по возможности кратки, так как ничего аномального в нем нет. Как и при плавлении, так и при парообразовании происходит изменение объема: у всех тел так же как и у воды это изменение положительно: пар занимает большее пространство, чем жидкость, из которой он получился. И это расширение, как известно, огромно. Не меньше 1.650 литров пара образуется из одного литра воды,— по крайней мере, если парообразование происходит при 100° , т.-е. в нормальных условиях.

После этого отступления вернемся к теплоемкости пара. Несмотря на усложнение задачи введением двух теплоемкостей, мы не исчерпали вопроса: существует еще третий род теплоемкости — теплоемкость насыщенного пара — новое понятие, введение которого на первый взгляд не представляется нужным. Зададим себе вопрос: какое количество тепла необходимо сообщить пару, чтобы его температура поднялась на 1 градус, и чтобы при этом было выполнено одно только условие — пар должен оставаться насыщенным. Пар, следовательно, может изменять свой объем, может изменять свое давление, требуется только, чтобы он продолжал быть „насыщенным“, несмотря на изме-

пение температуры; следовательно, пар не может ни опускаться ниже границы насыщения и быть, как мы его назовем, недосыщенным *), ни переходить эту границу вверх; в последнем случае, как вытекает из самого понятия насыщения, часть пара обращается в жидкую воду в форме тумана.

И вот в этом вопросе термодинамическая теория и подтверждающий ее эксперимент приводят к удивительному результату. Представим себе наполненный насыщенным паром сосуд, вполне защищенный как от притока тепла, так и от охлаждения; процессы, которые могут совершаться в таком сосуде, принято называть „адиабатическими“. Если мы при помощи поршня или как-нибудь иначе сдавим заключенный в сосуде пар, то для пара, выражаясь житейски, возникают два искушения: либо сделаться пересыщенным вследствие уменьшения объема, либо сделаться перегретым вследствие сопровождающего сжатие повышения температуры. Является вопрос, какое из этих двух действий будет в действительности иметь место. Если он окажется пересыщенным, т.-е. перевесит прямое влияние давления, то для возвращения прежнего состояния необходимо сообщить пару извне некоторое количество тепла, которое, будучи разделено на измеренное внутри сосуда повышение температуры, даст величину теплоемкости. Это—случай нормальный. Если же перевесит сопровождающее сжатие повышение температуры, т.-е. пар

*) Мы употребляем здесь это выражение в целях наглядности: техническое выражение „перегретый“ может породить недоразумения и затруднить усвоение новых представлений.

перестанет быть насыщенным, придется от пара отнять тепло или, как говорят, сообщить ему отрицательное количество тепла; и отсюда (так как изменение температуры, как и раньше, положительно) частное от деления обеих величин, т.-е. теплоемкость будет отрицательной.

Обратное будет наблюдаться, когда пар расширяется при уменьшении давления. В этом случае явление нормально, когда пар становится ненасыщенным и требуется отнятие тепла, чтобы пар оставался насыщенным: аномально протекает явление, если при перевешивающем влиянии охлаждения от расширения пар пересыхает и для устранения этого требуется сообщение тепла. Так как изменение температурного состояния газа здесь отрицательное (происходит охлаждение), теплоемкость снова в случае нормальном будет положительной, в аномальном—отрицательной. И следовательно, мыслим странный случай, когда теплоемкость пара, долженствующего оставаться насыщенным, величина отрицательная; результат, который едва ли мог кому-нибудь сниться, если позволено будет употребить такое выражение. На вопрос, когда имеет место случай нормальный, когда аномальный,—теория дает ответ при помощи одной очень простой формулы, в которой главную роль играют теплота испарения S жидкого тела и абсолютная температура T :

$$D = S - \frac{796}{T},$$

где D —теплоемкость насыщенного пара. Так как S для воды близко к единице и при высоких тем-

пературах во всяком случае только немного больше, то для всех температур, не превышающих 600° Кельвина, т.-е. до 500° Цельсия, D всегда отрицательно; иначе говоря, теплоемкость насыщенного водяного пара на всем протяжении доступных наблюдению температур, — отрицательна. Это — шестая аномалия воды.

При беглом взгляде на дело, без сомнения, можно думать, что при сжатии происходит пересыщение, а стало-быть компрессию сопровождает и образование тумана (если только этому не препятствует приток тепла извне), и наоборот — при разрежении пар должен оставаться прозрачным. У воды мы как раз находим обратное и не только теоретически, но и на опыте. Здесь мы не станем описывать сложных опытов, которые подтверждают это; ограничимся простым демонстрационным опытом, имеющим также то преимущество, что он обнаруживает еще одно интересное обстоятельство. Для этого нам требуется только стеклянный сосуд, наполненный насыщенным паром и соединенный при помощи трубки с воздушным насосом, позволяющим по произволу увеличивать или уменьшать давление в сосуде; при этом совершенно не требуется окружать сосуд плохим проводником тепла, если только изменения давления происходят достаточно внезапно, такие внезапные процессы всегда адиабатичны, так как тепло не успевает передаться газу извне, или перейти от него наружу. (Вместо воздушного насоса можно употребить резиновый баллон, который можно быстро сжать и затем отпустить).

Оказывается, что при сжатии газ остается прозрачным, наоборот, при внезапном разрежении на-

блюдается образование тумана. При этом можно наблюдать, хотя это и не имеет прямого отношения к нашей теме, что, если внутри сосуда совершенно нет пыли, то и при разрежении не наблюдается образования тумана: для этого необходимо присутствие частиц пыли, так называемых туманных или конденсационных ядер; но пыль, если она искусственно не удалена, всегда присутствует в воздухе, особенно в промышленных центрах и городах (уголь и частицы извести), также и у моря (частицы соли), меньше всего ее в горах. Чем больше этих ядер, тем легче, скорее и обильнее образуются капли тумана; при вышеописанном опыте наблюдаются красивые красочные явления, указывающие на присутствие ядер, около которых происходит диффракция света.

Как бы ни было интересно это явление, оно пока еще не выходит за пределы лабораторного опыта. Тем не менее, сюда присоединяется новое соображение, которое показывает, что данное явление имеет своеобразное и решительное влияние на повседневные явления природы, а стало-быть и на жизнь человека; тем удивительнее, что в большинстве научных и почти во всех популярных книгах или совсем не обращается внимания на это обстоятельство, или же ему не придается достаточного значения.

Мы все свыклись с основными явлениями погоды; когда барометр быстро падает, мы ждем плохой погоды; наоборот—хорошую погоду обещает быстро поднимающийся барометр. Однако это явление стоит в противоречии с нашими представлениями, что пар превращается в жидкость не при падении давления, а наоборот—при его увеличении. На самом

леле многие жилкости именно так себя и ведут; и если бы на Земле вместо водяного покрова и воздушной оболочки, содержащей водяной пар, был бы покров эфирный и атмосфера из паров эфира, то характер погоды на Земле был бы как раз обратный тому, что есть на самом деле: он был бы нормальным. У воды и ее паров он аномален; но к этому порядку вещей мы так привыкли, и человеческий дух настолько инертен в изучении и познании совершенно открыто лежащих противоречий, что мы принимаем окружающее так, как оно есть, не видя в нем аномалий. Вот почему этой шестой аномалии мы должны были посвятить особое внимание ¹⁾).

Х.

Оптико-электрические аномалии воды.

Совершенно невозможно в рамках этой книжки осветить все особенности воды и описать все связанные с ними явления. К таким явлениям принадлежат, например, капиллярные свойства воды (поднятие в тонких трубках, образование капель и т. д.), ее волнообразное движение, которое, как известно, приводит к самым разнообразным явлениям в текущих и стоячих водах вплоть до гигантского явления прилива и отлива, отношение воды к распространению в ней звука и многое другое.

¹⁾ На самом деле связь между барометром и погодой гораздо сложнее и зависит от многих привходящих условий; здесь указано только основное явление.

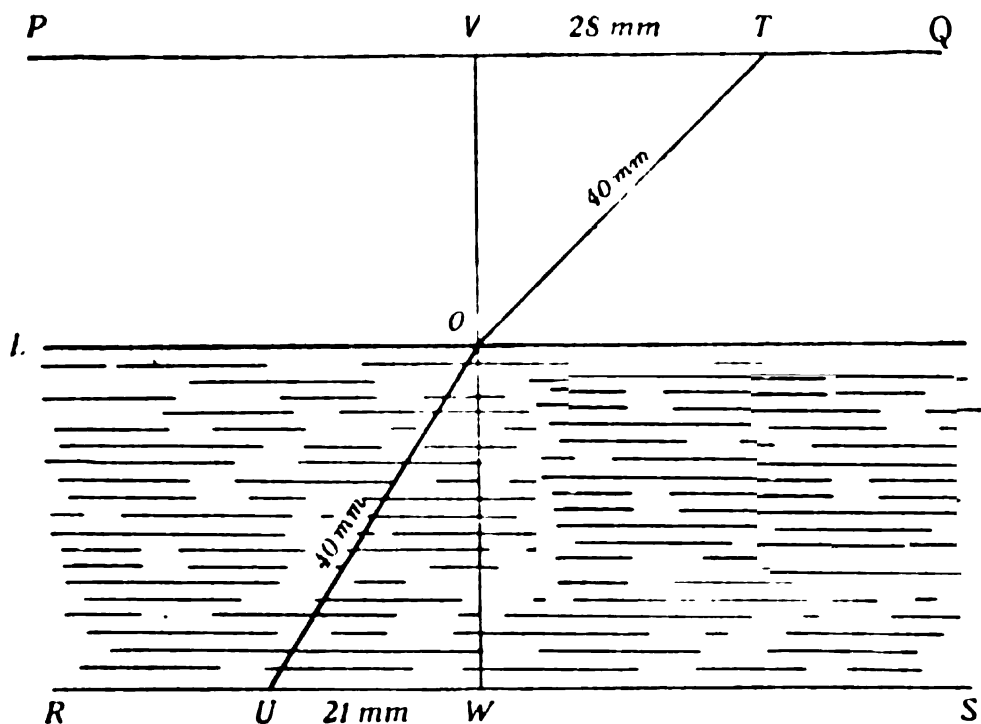
Однако, чтобы изложение не показалось слишком ограниченным и односторонним, необходимо по крайней мере хоть коснуться одной большой области, и это тем более, что тут мы будем иметь случай изучить седьмую и последнюю аномалию воды, которая в истории развития современной физики сыграла выдающуюся роль. Область, о которой идет речь,—огромная область электрических и оптических явлений. Мы говорим: область, тогда как в прежние времена надлежало говорить: области. Ибо оптика теперь—только одна из ветвей электрики; и как раз явление, о котором сейчас мы будем говорить, в первую очередь помогло перекинуть мост между обеими областями, из которых одна, оптика, только потому и пользовалась самостоятельностью (на практике и дальше будет оставаться обособленной), что для относящихся к ней явлений у нас имеется самостоятельный орган—глаз.

Обе вещи, о которых будем говорить, мы опишем отдельно и, за недостатком места, только в существенных чертах. Обе — величины количественные: это — поддающиеся измерению свойства тел; одна—чисто электрическая величина, другая—чисто оптическая. И лишь потом мы укажем связь между ними.

Если мы к изолированной, электрически заряженной металлической пластинке поднесем другую, незаряженную и сообщенную с Землей, то на последней обнаружится противоположный заряд, а между пластинками образуется электрическое напряжение, некоторая разность потенциалов; обе пластинки можно изолировать, тогда получится удвоенное напряжение. Чем больше заряд, тем большее полу-

чается напряжение: однако и при одинаковом заряде напряжение может быть различно, в зависимости от среды, отделяющей обе пластинки. Если в каком-нибудь определенном случае (для чего необходимо и определенное расстояние), напряжение в воздухе равно единице, то при помещении между пластинками, например, параффина, оно уменьшается до половины; или наоборот: если мы хотим теперь снова достичь напряжения, равного единице, мы должны сообщить пластинкам двойной заряд. Говорят, емкость описываемого прибора (конденсатора), с параффином, двойная по сравнению с воздушным конденсатором, и параффины приписывают некоторое свойство, численно обозначаемое числом 2 и называемое „диэлектрической постоянной“. Таким образом каждое вещество, особенно каждый непроводник электричества (у проводников явление сложнее) имеет свою диэлектрическую постоянную. У газов она близка к единице, у твердых и жидких тел ее величина колеблется между 2 и 8-ю; и только немногие тела превышают это число (алкоголь, например, имеет диэлектрическую постоянную в 26), и только вода имеет необыкновенно большую диэлектрическую постоянную, именно 80! В воде следовательно пластинки конденсатора должны быть в 80 раз сильнее заряжены, чем в воздухе, чтобы получить одинаковое между ними напряжение. Нет другого такого вещества, которое имело хотя бы приблизительно такую большую диэлектрическую постоянную. Тут, следовательно, мы опять сталкиваемся с тем из ряда вон выходящим положением воды, которое уже имели случай наблюдать при изучении теплоемкости, теплоты плавления и паро-

образования. И тут эта особенность присуща только жидкому состоянию, так как лед имеет диэлектрическую постоянную всего в 3,7—контраст, который пытались объяснить на основании современной



Черт. 9. Луч TO падает в точке O на поверхность воды и, преломляясь, приближается к перпендикуляру OW .

электронной теории особым предположением о строении воды (диполи).

Переходим теперь к оптическим величинам. Когда пучок лучей вступает из воздуха в воду, то наблюдается изменение направления лучей, пре-

ломление; чем больше угол падения, тем больше и угол преломления; существует вполне определенный закон, который на языке тригонометрии выражается так: отношение синуса угла падения к синусу угла преломления—для всех углов падения—одно и то же, и характерно для вещества, в которое падает луч из воздуха; эта величина и называется „коэффициентом преломления“ тела (так как эта величина—частное двух чисел, а не показатель, то обычное ее название „показатель преломления“—бессмысленно). Если желательно избежать тригонометрического выражения, то, на основании черт. 9, можно то же определить иначе: представим себе мысленно границу между водой и воздухом LOM и проведем две параллельные плоскости PQ и RS таким образом, чтобы отрезки лучей OT и OU были равны; тогда коэффициент преломления характеризуется расстоянием точек T и U от перпендикуляра WV , т.-е. отношением отрезков TV и UW . Короче говоря: коэффициент преломления есть отношение расстояний от перпендикуляра двух точек луча—в воде и воздухе, точек, равноудаленных от точки падения O . На рисунке $TO=OU=40$ мм., $TV=28$, $UW=21$ мм., следовательно коэффициент прело-

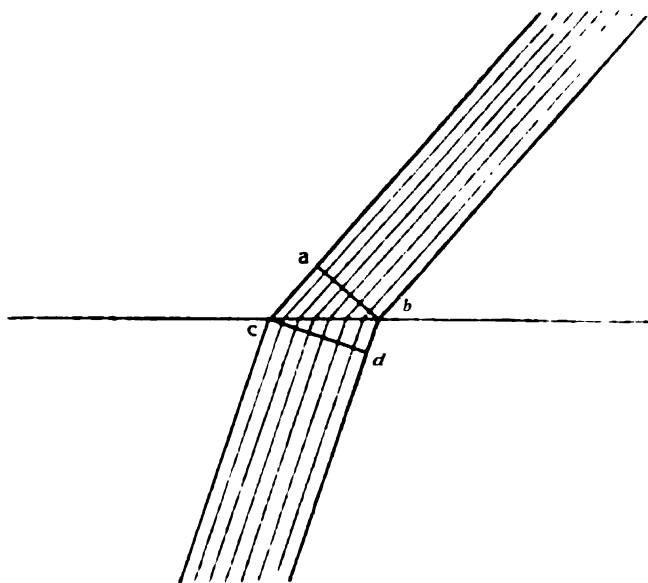
мления воды
$$N = \frac{TV}{UW} = \frac{28}{21} = \frac{4}{3} = 1\frac{1}{3} = 1,33.$$

Коэффициент преломления,-- пока речь идет о фактической стороне дела,—величина геометрическая; чтобы постараться понять физическое ее значение, необходимо ввести в рассмотрение скорости, с которыми распространяется луч света в разных средах, в данном случае—в воздухе и воде. Однако,

чтобы вполне осознать явление преломления, необходимо остерегаться выделять один „луч“, ибо такого нет и быть не может; следует брать пучок лучей и лучше всего, как на чертеже 10, пучок параллельных лучей. При этом желательно проследить оба крайние луча этого пучка; и для краткости и наглядности может быть рационально заменить эти „фланговые“ лучи фланговыми солдатами колонны или, если мы хотим быть верными физической лаборатории, заменим их двумя колесиками, связанными осью и катящимися по плоскости, одна половина которой полирована (стекло), другая—матовая (бархат). Как видно из чертежа 10-го, при косом направлении движения одно колесико достигнет границы раньше, чем другое, и станет двигаться теперь медленнее, чем другое; а так как ось негибаема, то неизбежным следствием этого должно явиться изменение направления пути (сравните положения а—в и с—d). Отсюда уже сразу видно, что коэффициент преломления есть не что иное, как отношение скоростей света в воздухе и воде. Запомним это.

Возвратимся к диэлектрической постоянной. Мы можем параллельно прежнему опыту поставить и другой, или, вернее говоря, несколько других опытов. Мы представляли себе раньше пластинки длительно заряженными, т.-е. наш опыт был статическим. Вместо этого мы можем попеременно заряжать и разряжать пластинки (или перезаряжать их) и таким образом получить электрические колебания, а в среде между пластинками—электрические волны. Тут-то и обнаруживается, что диэлектрическая постоянная находится в зависимости от этих волн, как коэффициент преломления от скорости света. Только

диэлектрическая постоянная измеряется не отношением скоростей в обеих средах, а квадратом их; и, если представить себе свет, как некоторый род электрического волнообразного движения, то получается следующая простая зависимость: диэлектри-



Черт. 10. Луч ac доходит до точки c в момент, когда луч b достиг уже (внутри среды) до точки d . Скорость луча внутри среды меньше, чем в воздухе.

ческая постоянная равна квадрату коэффициента преломления N :

$$D = N^2, N = \sqrt{D}.$$

Эта поразительная зависимость между двумя, с первого взгляда совершенно ничего общего не имеющими величинами, найдена у очень многих веществ, если и не всегда точно, то во всяком

случае с достаточным приближением. Однако, некоторые тела уклоняются от этого правила и в особенноеи вода, имеющая диэлектрическую постоянную, равную 80; отсюда коэффициент преломления должен был бы быть около 9 ($\sqrt{80}$), на самом деле он равен лишь 1,33!

Если какой-нибудь удивительный и редкостный закон хоть и подтверждается многими явлениями, по некоторыми не вполне, а третьи вовсе ему не подчиняются, то отсюда еще не следует, что закон этот опровергнут и является неверным; необходимо подвернуть его основательному пересмотру, необходимо исследовать, удовлетворяют ли ему две величины, связанные законом, во всех случаях или может-быть они удовлетворяют ему только тогда, когда эти величины найдены лишь совершенно определенным образом, т.-е. зависят от условий опыта. И в данном случае это действительно так. Оптический коэффициент преломления какого-нибудь вещества не является величиной, выражаемой одним и тем же числом для всех случаев, он зависит в значительной степени от рода света или, говоря яснее, от цвета, к которому он относится. При переходе из воздуха в другую среду, голубой свет преломляется сильнее красного; вообще говоря, с убывающей длинной волны или, что то же самое, с возрастанием частоты колебаний коэффициент преломления непрерывно увеличивается. Подобным же образом измерениями установлено, что диэлектрическая постоянная данного вещества получается тем больше, чем быстрее происходит перемена заряда.

Это явление называют дисперсией, в одном случае

оптической дисперсией (или светорассеянием), в других электрической дисперсией. Раз частота имеет влияние в каждой из этих областей, то можно поставить вопрос, сравнимы ли между собой частоты обеих областей.

На этот вопрос следует отвечать резко отрицательно. Тогда как при электрических колебаниях речь идет о частоте в лучшем случае в несколько сот миллиардов в секунду, при оптических колебаниях мы имеем дело с сотнями биллионов, т.-е. во втором случае частота в тысячу раз больше, чем в первом.

Таким образом непосредственно сравненным с диэлектрической постоянной является не оптический, а электрический коэффициент преломления; последний получится, если мы электрические волны направим на границу двух средин и будем наблюдать изменение их направления. И тогда для воды действительно получается коэффициент преломления равным 9, т.-е. корню квадратному из диэлектрической постоянной, как этого и требует теория. Перейдем от электрических волн к оптическим, т.-е. световым лучам; здесь сравнение не дает нам ничего утешительного; так как с возрастающей частотой колебаний коэффициент преломления должен уменьшаться, то оптический коэффициент преломления воды должен бы быть еще больше 9; однако он, напротив, гораздо меньше.

Следует ли при таких обстоятельствах отказаться от всякого рассмотрения и объяснения явления? Пожалуй, и стоило бы поступить таким именно образом, если бы не вспомнилось одно известное из чистой оптики и весьма удивительное явление,

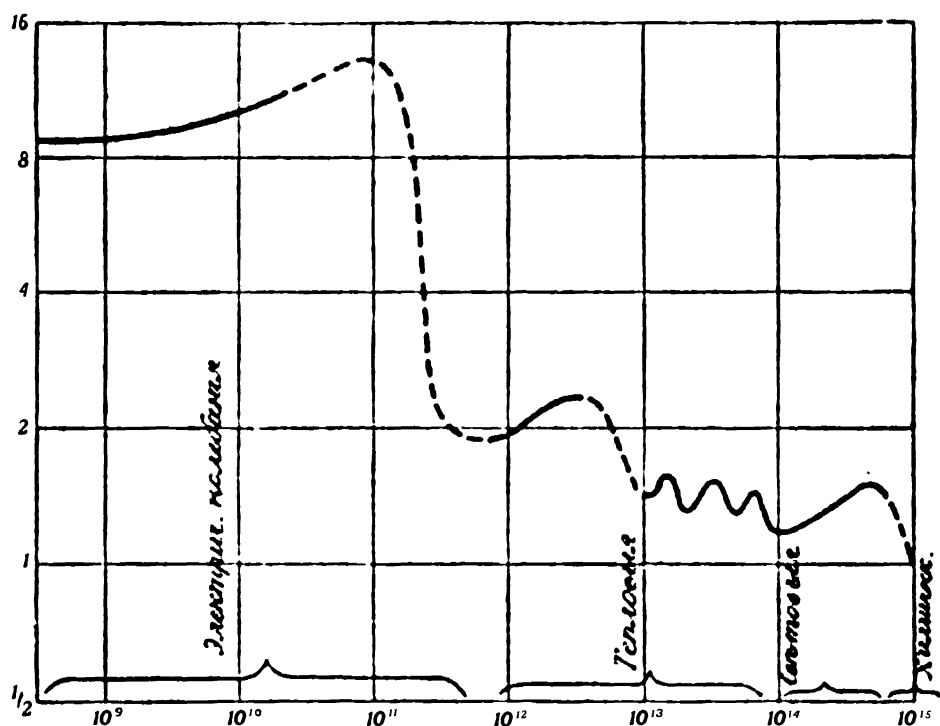
которое представляет собою оптическую аномалию: аномальная дисперсия некоторых веществ, как, например, фуксина или паров натрия. Эти и многие другие вещества имеют ту особенность, что коэффициент преломления в широкой области возрастающих частот увеличивается нормально, но в определенном месте этой области почти сразу перескакивает на меньшее значение,—значение, которое даже не редко лежит ниже его значения для наименьших частот. Такое поведение коэффициента преломления наиболее ясно и замечательно выявляется через аномальное строение спектра такого рода веществ; в этом случае спектр не начинается, как обычно нормальный спектр, с красного цвета и кончается фиолетовым,—он начинается зеленым, правильно идет до фиолетового конца, затем появляется красная часть до зеленой. Диалогично существует аномалия электрической дисперсии, протекающая соответственным же образом.

У воды как электрический, так и оптический спектр совершенно нормальны, тем не менее оба они, как мы видели, не соответствуют друг другу. Ясно, почему это может происходить: здесь имеет место не оптическая аномалия и не электрическая, тут мы встречаемся с аномалией в области, лежащей между обоими спектрами. И эта область, как вытекает из предыдущего, необыкновенно растянута, так как она заполняет пропасть между величинами, относящимися между собой как 1: 1000, или по меньшей мере как 1: 100, если иметь в виду крайние обращенные одна к другой границы этих областей. В этой области лежат колебания, проявляющие

себя как тепловые лучи, а может-быть и другие, как, например, электрические, магнитные и те неизвестные колебания, которые в будущем могут быть обнаружены более тонкими методами. Здесь должна находиться аномалия воды, и что это действительно так, можно видеть из поведения воды по отношению к самым длинным из наблюдавшихся тепловых волн. Тут мы подходим к самому интересному и решительному пункту всего дела.

Установлено, что аномальная дисперсия всегда связана с другими явлениями: абсорбцией, т.-е. поглощением лучей, проходящих через определенную среду. Связь эта следующая: повсюду, где происходит абсорбция, т.-е. в области тех длин волн, для которых среда имеет, как говорится, полосу поглощения, происходит аномальная дисперсия; это значит, что коэффициент преломления здесь необыкновенно быстро убывает, в противоположность своему обычному возрастанию с увеличением частоты колебания. И для тепловых лучей у воды имеется много полос поглощения. Однако, этого еще недостаточно для объяснения колоссальной разницы между 9 и 1,33; следует допустить, что в области еще не исследованной между одним и десятью биллионами колебаний в секунду лежат еще другие аномальные полосы воды. На ряду с этим следует заметить, что и на другом конце спектра, т.-е. за самыми быстрыми световыми колебаниями, в области химически действующих лучей, у воды снова появляется абсорбция, в соединении с аномальной дисперсией. На чертеже 11 все поведение воды наглядно изображено кривой, у которой абсциссы представляют возрастающие частоты колебаний, а ординаты — значе-

ние коэффициента преломления; впрочем, кривая не претендует на точное представление числовых отношений, она должна только передать общий характер явления; и чтобы этого достичь, надо принимать во внимание обширность области, к которой относится рисунок, прибегнуть к искусственному



Черт. 11. Зависимость коэффициента преломления от длины волны (в воде).

приему: ось абсцисс, так же как и ось ординат, делится не по правилам арифметики, а по правилам геометрии, т.-е. равные отрезки оси соответствуют не равным отношениям рассматриваемых величин (не равным разностям); таким образом частотам 10^9

(1 миллиард), 10^{10} , 10^{11} , до 10^{15} , соответствуют коэффициенты преломления 1, 2, 4, 8. Поднимающиеся ветви кривой соответствуют нормальному поведению, опускающиеся -- аномальному; те части кривой, которые лежат в гипотетической области, начерчены пунктиром.

В общем мы видим, что опять и здесь у воды замечательная особенность; мост между ее электрическими и оптическими явлениями может быть переброшен только при посредстве очень запутанной кривой. Это и есть седьмая аномалия воды.

XI.

Заключение.

Оглянемся теперь назад и мы увидим следующую схему явлений, которые у воды протекают совсем иначе, чем у большинства веществ:

1. Максимум плотности при 4° C.
2. Сжатие (вместо расширения) при плавлении.
3. Понижение (вместо повышения) точки плавления при давлении.
4. Минимум теплоемкости при 27° C.
5. Убывание (вместо возрастания) теплоты плавления с понижением температуры.
6. Отрицательная величина теплоемкости насыщенного водяного пара, с вытекающим отсюда следствием образования тумана.
7. Аномальная дисперсия в области электрических и тепловых лучей.

К этим аномалиям прибавляется еще и то, что не

только качественно, но и количественно поведение воды оказывается в области „нормальной“ настолько исключительным, что и здесь бросается в глаза положение нашего вещества: а именно — чрезмерно большое значение некоторых характерных постоянных:

- а) теплостойкости,
- в) теплоты плавления,
- с) теплоты парообразования,
- д) диэлектрической постоянной.

Все эти величины у воды необыкновенно велики, они оказываются во много раз больше соответственных величин для большинства других веществ, не исключая и наиболее родственных воде.

Мозг, расположенный к философскому мышлению, не может закончить темы не спросив, что же означают эти аномалии и особенности воды? Ограничимся коротким упоминанием, что почти все эти особенности воды неблагоприятны людям: гораздо лучше было бы для природы человека и для техники, если бы в воде все обстояло нормально. Но для самой природы дело обстоит совершенно иначе (как мы уже указали в одном из специальных случаев); при всем этом можно быть почти уверенным, что, благодаря своим особенностям, вода заняла в природе то место, которое ей принадлежит теперь. Ибо при образовании отдельных существующих в настоящее время частей вселенной, и в особенности нашей Земли, возгорелись жаркие войны между веществами,—война за существование и преобладание, и тут вода, по край-

ней мере на Земле, бесспорно вышла победительницей. Но оставим идеи, увлекающие нас все дальше и дальше в область прекрасной, но шаткой фантазии, и подумаем лучше о той внутренней связи, которая существует между нашим организмом, нашей физической и психической сущностью и водой, и закончим вариант еще до сих пор не вполне исчерпанного выражения: самое удивительное и самое лучшее—это вода.

О Г Л А В Л Е Н И Е

I. Вещества нормальные и аномальные	3
II. Первая аномалия воды	5
III. Внезапное расширение и сжатие	11
IV. Влияние внешнего давления	15
V. Теплоемкость	18
VI. Теплота плавления	23
VII. Теплота парообразования	26
VIII. Водяной пар	34
IX. Две теплоемкости	39
X. Оптико-электрические аномалии воды	49
XI. Заключение	61

Вышли из печати, печатаются и готовятся к печати
следующие издания

„НАУЧНОГО КНИГОИЗДАТЕЛЬСТВА“:

С. ГАЛЬПЕРСОН. *Атлас Луны.* (Распродано).

Ф. АУЭРБАХ. *Царица мира и ее тень.* (Энергия
и энтропия). С 9 рис.

Ф. АУЭРБАХ. *Семь аномалий воды.* С 11 рис.

А. ЦАРТ. *Кирпичи мироздания.* С 45 рис.

А. БАВИНК. *Введение во всеобщую химию.*

Ч. БОЙС. *Мыльные пузыри.* С 78 рис. и цветной
таблицей.

Р. ФАТЕР. *Элементы машин.* Со многими рис.

Продажа во всех книжных магазинах.

СКЛАД ИЗДАНИЙ: „НАУКА и ШКОЛА“

Литейный 38, тел. 6-12-80

Литейный 48, тел. 6-08-03

Цена 3 руб. 50 коп.
