

PUZZLES OF WATER

Yu. I. NABERUKHIN

Ordinary water is a liquid full enigmas because many of its properties (density, compressibility, heat capacity, etc.) display anomalous behavior which is not typical for other liquids. The reason is the specific structure of water is caused by the hydrogen bonds between its molecules, whole configurations change with temperature or pressure.

Обычная вода на самом деле является загадочной жидкостью, поскольку многие ее свойства (плотность, сжимаемость, теплоемкость) являются аномальными – не похожими на свойства большинства других жидкостей. Причина этого заключается в особой структуре воды, обусловленной водородными связями между ее молекулами, которая изменяется с температурой или давлением.

ЗАГАДКИ ВОДЫ

Ю. И. НАБЕРУХИН

Новосибирский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Вода в нашей жизни – самое обычное и самое распространенное вещество. Однако с научной точки зрения это самая необычная, самая загадочная жидкость. Пожалуй, только жидкий гелий может соперничать с ней. Но необычные свойства жидкого гелия (такие, как сверхтекучесть) проявляются при очень низких температурах (вблизи абсолютного нуля) и обусловлены специфическими квантовыми законами. Поэтому жидкий гелий – это экзотическое вещество. Вода же в нашем сознании является прообразом всех жидкостей, и тем более удивительно, когда мы называем ее самой необычной. Но в чем же заключается необычность воды? Дело в том, что трудно назвать какое-либо ее свойство, которое не было бы аномальным, то есть ее поведение (в зависимости от изменения температуры, давления и других факторов) существенно отличается от такового у подавляющего большинства других жидкостей, у которых это поведение похоже и может быть объяснено из самых общих физических принципов. К таким обычным, нормальным жидкостям относятся, например, расплавленные металлы, сжиженные благородные газы (за исключением гелия), органические жидкости (бензин, являющийся их смесью, или спирты).

АНОМАЛИЯ ПЛОТНОСТИ

Мы опишем здесь только некоторые необычные свойства воды. Всем известна аномалия плотности. Она двоякая (рис. 1). Во-первых, после таяния льда

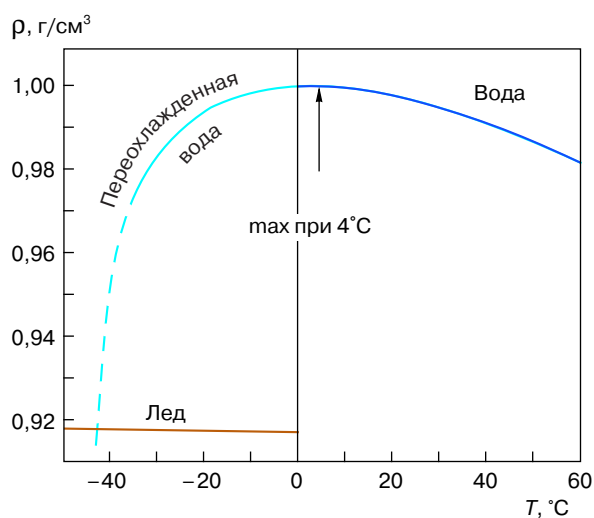


Рис. 1. Зависимость плотности воды от температуры.

плотность увеличивается, проходит через максимум при 4°C и только затем уменьшается с ростом температуры. В обычных жидкостях плотность всегда уменьшается с температурой. И это понятно. Чем больше температура, тем больше тепловая скорость молекул, тем сильнее они расталкивают друг друга, приводя к большей рыхлости вещества. Разумеется, и в воде повышение температуры увеличивает тепловую скорость молекул, но почему-то это приводит в ней к понижению плотности только при высоких температурах.

Вторая аномалия плотности состоит в том, что плотность воды больше плотности льда (благодаря этому лед плавает на поверхности воды, вода в реках зимой не вымерзает до дна и т.д.). Обычно же при плавлении плотность жидкости оказывается меньше, чем у кристалла. Это тоже имеет простое физическое объяснение. В кристаллах молекулы расположены регулярно, обладают пространственной периодичностью — это свойство кристаллов всех веществ. Но у обычных веществ молекулы в кристаллах, кроме того, плотно упакованы. После плавления кристалла регулярность в расположении молекул исчезает, и это возможно только при более рыхлой упаковке молекул, то есть плавление обычно сопровождается уменьшением плотности вещества. Такого рода уменьшение плотности очень мало: например, при плавлении металлов она уменьшается на 2 — 4%. А плотность воды превышает плотность льда сразу на 10%! То есть скачок плотности при плавлении льда аномален не только по знаку, но и по величине.

ПЕРЕОХЛАЖДЕННАЯ ВОДА

В последнее время много внимания уделяется изучению свойств переохлажденной воды, то есть остающейся в жидком состоянии ниже точки замерзания 0°C. (Переохладить воду можно либо в тонких капиллярах, либо — еще лучше — в виде эмульсии: маленьких капелек в неполярной среде — «масле»). Что же происходит с аномалией плотности при переохлаждении воды? Она ведет себя странно (см. рис. 1). С одной стороны, плотность воды сильно уменьшается по мере переохлаждения (то есть первая аномалия усиливается), но, с другой стороны, она приближается к плотности льда при понижении температуры (то есть вторая аномалия ослабевает).

АНОМАЛИЯ СЖИМАЕМОСТИ

Вот еще пример аномалии воды: необычное температурное поведение ее сжимаемости, то есть степени уменьшения объема при увеличении давления (рис. 2). Обычно сжимаемость жидкости растет с температурой: при высоких температурах жидкости более рыхлы (имеют меньшую плотность) и их легче сжать. Вода обнаруживает такое нормальное поведение только при высоких температурах. При низ-

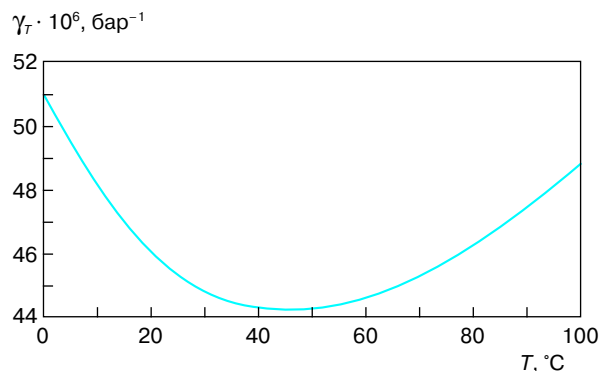


Рис. 2. Поведение с температурой изотермической сжимаемости воды при давлении 1 атм.

ких же сжимаемость ведет себя противоположным образом, в результате чего в ее температурном поведении появляется минимум при 45°C.

На этих двух примерах мы видим, что необычные свойства воды характеризуются экстремальным поведением, то есть появлением максимумов (как в плотности) или минимумов (как в сжимаемости) на кривых их зависимостей от температуры. Такие экстремальные зависимости означают, что в воде имеет место противоборство двух процессов, каждый из которых обуславливает противоположное поведение рассматриваемого свойства. Один процесс — это обычное тепловое движение, усиливающееся с ростом температуры и делающее воду (как и любую другую жидкость) более разупорядоченной; другой процесс необычный, присущий только воде, за счет него вода становится более упорядоченной при низких температурах. Разные свойства воды по-разному чувствительны к этим двум процессам, и поэтому положение экстремума наблюдается для каждого свойства при своей температуре.

АНОМАЛИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Что же это за необычный процесс, происходящий в воде и делающий ее непохожей на другие жидкости? Чтобы уяснить его физическую сущность, рассмотрим еще одну, на мой взгляд, самую сильную аномалию воды — температурное поведение ее теплоемкости (рис. 3). Величина теплоемкости, как известно, показывает, сколько нужно затратить тепла, чтобы поднять температуру вещества на один градус. Для подавляющего числа веществ теплоемкость жидкости после плавления кристалла увеличивается незначительно — никак не более 10%. Другое дело — вода. При плавлении льда теплоемкость скачет от 9 до 18 кал/моль · град, то есть в два раза! Такого огромного скачка теплоемкости при плавлении не наблюдается ни у одного другого вещества: здесь вода абсолютный рекордсмен.

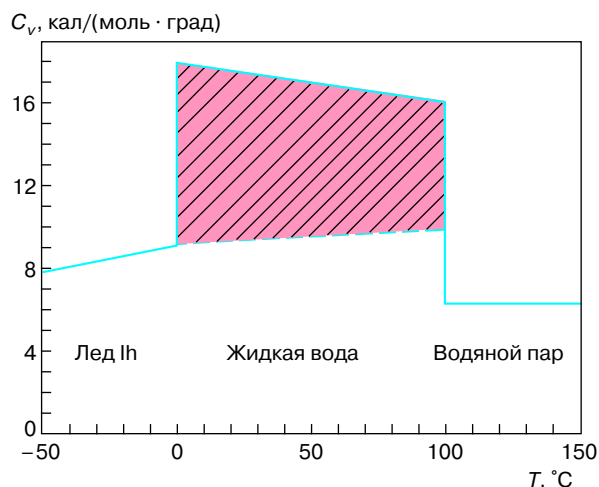


Рис. 3. Теплоемкость водной системы в зависимости от температуры. Штриховкой показан вклад аномальной составляющей теплоемкости в жидкой воде.

Во льду энергия, подводимая для нагревания, тратится в основном на увеличение тепловой скорости молекул. Скачок теплоемкости после плавления означает, что в воде открываются какие-то новые процессы (и очень энергоемкие), на которые тратится подводимое тепло и которые обуславливают появление избыточной теплоемкости. Из рис. 3 видно, что такая избыточная теплоемкость и, следовательно, упомянутые энергоемкие процессы существуют во всем диапазоне температур, при которых вода находится в жидком состоянии. Она исчезает только в паре, то есть эта аномалия является свойством именно жидкого состояния воды.

На рис. 4 показано, что нового вносят в проблему теплоемкости исследования последних лет по

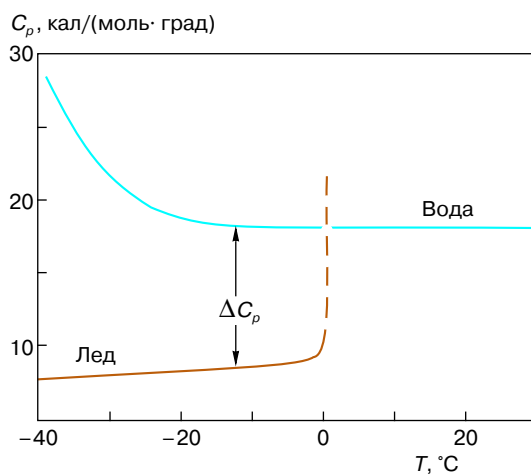


Рис. 4. Температурное поведение теплоемкости переохлажденной воды.

изучению свойств переохлажденной воды. Мы видим, что при сильном переохлаждении теплоемкость сильно возрастает, то есть аномальный вклад в нее еще больше увеличивается. Переохлажденная вода еще более аномальна, чем обычная.

ПЕРЕСТРОЙКА СТРУКТУРЫ

Мы должны, наконец, объяснить, что это за необычные процессы, происходящие в воде и делающие ее такой аномальной жидкостью. Ключевым словом здесь является перестройка: перестройка структуры. Мы приходим к необходимости рассмотрения особенностей структуры воды.

ВОДОРОДНЫЕ СВЯЗИ

Структура любого вещества, то есть закономерности взаимного расположения составляющих его частиц, определяется характером взаимодействий между молекулами. И специфика структуры воды обусловлена особыми свойствами взаимодействий между молекулами воды. Рассмотрим простейшие свойства родственных с водой жидкостей — гидридов VI группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева (рис. 5). Мы видим, что вода резко выпадает из плавной зависимости температур плавления и кипения этих жидкостей: если бы общие закономерности выполнялись и для воды, то она замерзала бы при -100°C и кипела бы при -76°C . Здесь наглядно показано, что между молекулами воды действуют какие-то особые силы, которые отсутствуют в родственных ей гидридах. Эти силы принято называть водородными связями.

Водородные связи между молекулами воды возникают в результате специфического распределения в них электронной плотности. На атомах

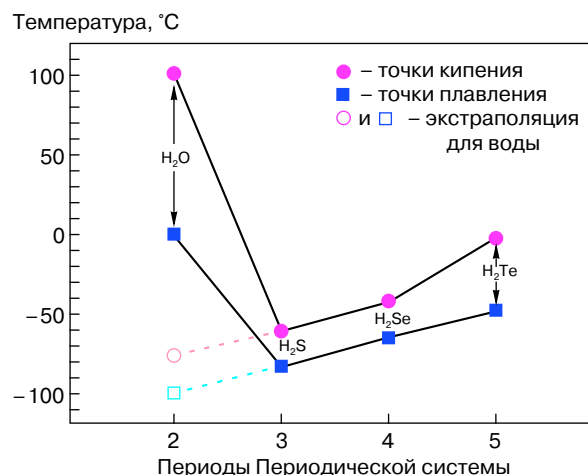


Рис. 5. Точки плавления и кипения в изоэлектронном ряду гидридов VI группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Пунктиром показана экстраполяция “нормальных” зависимостей.

водорода имеется некоторый положительный заряд, а на атоме кислорода — отрицательный (в целом же молекула воды, конечно, электрически нейтральна). Хорошей моделью воды в этом отношении является правильный тетраэдр, в центре которого находится атом кислорода, в двух вершинах (соответствующих атомам водорода) расположены положительные точечные заряды (равные примерно 20% от заряда электрона), а в двух других — отрицательные заряды, изображающие распределение электрон

тронной плотности на атоме кислорода (рис. 6а). В такой модели углы между каждой парой линий, соединяющих центр (атом О) с вершинами, равны $109,5^\circ$ — так называемому тетраэдрическому углу θ_T (рис. 6б). Наиболее выгодным расположением других молекул воды вокруг данной является такое, что против положительного заряда одной расположен отрицательный заряд другой и центры атомов О и Н одной и О другой находятся на одной линии $O-H \dots O$ (здесь сплошной линией показана химическая

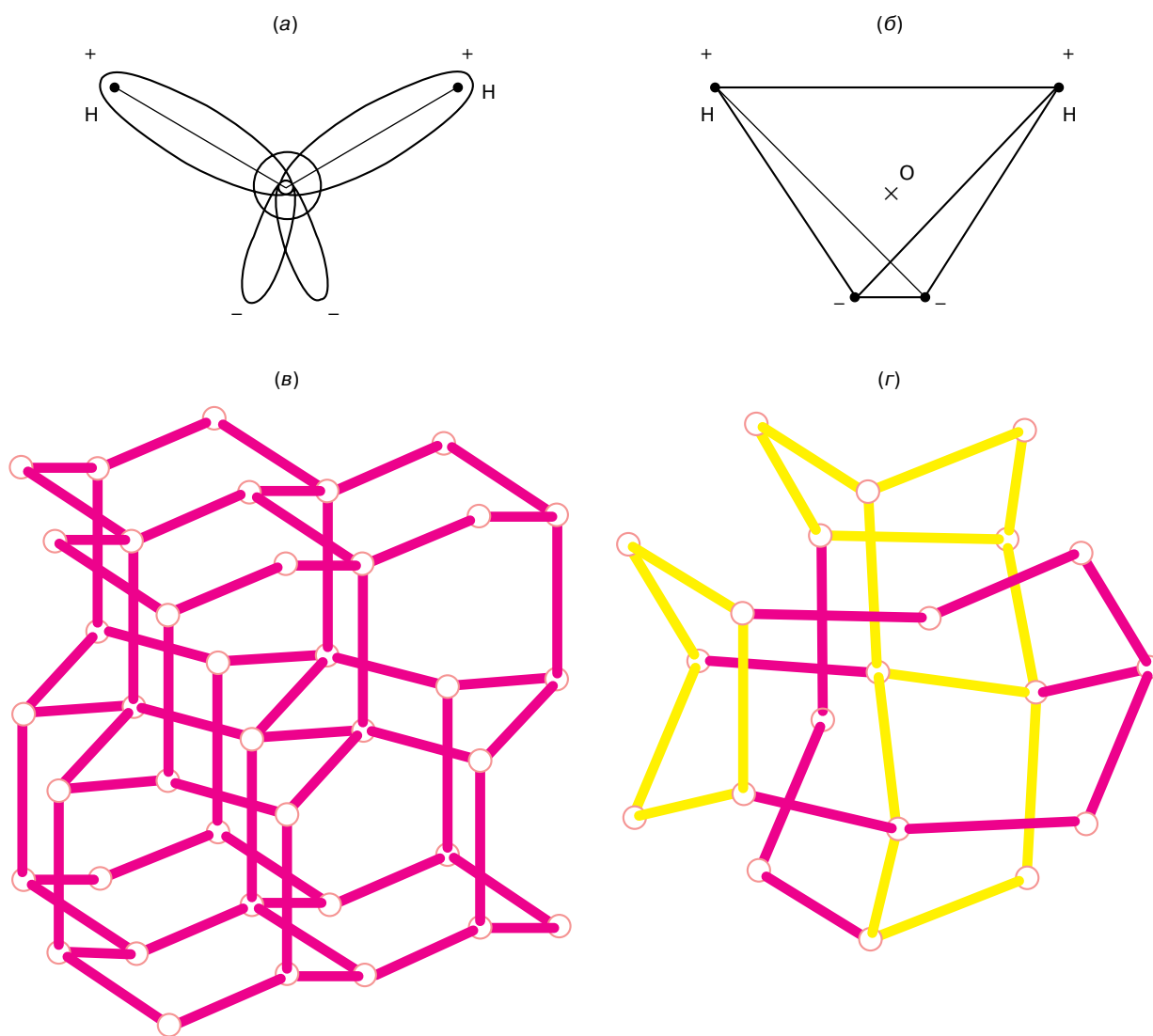


Рис. 6. Модели молекулы воды и структуры льдов.

а — Положение облаков положительного и отрицательного заряда; б — тетраэдрическая модель: в вершинах правильного тетраэдра расположены два положительных (в центрах атомов водорода) и два отрицательных точечных заряда. Атом кислорода находится в центре тетраэдра; в — фрагмент структуры льда Ih. Кругами обозначены молекулы воды, соединяющие их стержни — водородные связи (каждая молекула участвует в четырех водородных связях; показаны только связи, соединяющие изображенные на рисунке молекулы; вся структура состоит из шестичленных колец); г — фрагмент структуры льда III; здесь также каждая молекула участвует в четырех водородных связях (показаны не все); можно различить примкнувшие друг к другу пятичленные кольца, а также семичленные и восьмичленные кольца.

связь внутри одной молекулы, а точками — водородная связь между двумя молекулами). Мы видим, что водородная связь имеет электростатическую природу. У родственных воде гидридов атомы практически нейтральны — таково их химическое свойство, и поэтому водородные связи между их молекулами не образуются. Таким образом, особые свойства воды являются следствием специфического электронного устройства ее молекул.

СТРУКТУРА ЛЬДА

Описанная выше наиболее выгодная конфигурация водородных связей вокруг каждой молекулы воды реализуется в кристаллах льда. Его структура, которая нам точно известна из экспериментов по дифракции рентгеновских лучей или нейтронов, показана схематически на рис. 62. Как можно кратко описать такую структуру? Это сетка водородных связей: в узлах сетки находятся молекулы воды, а ее ребра образованы водородными связями. Сетка имеет особое устройство: в каждом ее узле сходятся четыре связи; поэтому сетку можно назвать четверной или четырехжды координированной. Все углы между связями в сетке равны тетраэдрическому углу θ_T ; поэтому сетка называется тетраэдрической. Мы видим также, что сетка состоит из изогнутых шестичленных колец; поэтому сетка называется гексагональной и вся структура льда обозначается как гексагональный лед (коротко, лед Ih).

Характерной особенностью структуры льда является то, что в ней молекулы упакованы рыхло. Если изобразить молекулу шаром, то при плотнейшей упаковке шаров вокруг каждого из них будет 12 соседей (см. статью Г. Маленкова в журнале “Химия и жизнь”, 1994 г., № 7, стр. 25). Во льду же их всего четыре. Если бы молекулы воды во льду были плотно упакованы, то его плотность составляла бы $2,0 \text{ г/см}^3$, тогда как на самом деле она равна $0,92 \text{ г/см}^3$. Казалось бы, рыхлость упаковки частиц, то есть наличие в ней больших объемов не заполненного молекулами пространства, должна приводить к неустойчивости структуры. Например, можно было бы ожидать, что при сжатии льда внешним давлением сетка водородных связей будет разрушаться, пустоты структуры будут с легкостью схлопываться, заполняясь молекулами, вырванными из этой сетки. Но не тут-то было! На самом деле сетка водородных связей не разрушается, а перестраивается. При повышении давления обычный гексагональный лед Ih меняет свою структуру.

ФОРМЫ ЛЬДА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Сейчас известно десять форм льда, устойчивых при высоких давлениях. И у всех сохраняется четырехжды координированная сетка водородных связей, то есть каждая молекула воды сохраняет в них все свои четыре водородные связи. Но из-за чего тогда увеличивается плотность таких сдавленных

форм льда по сравнению с обычным льдом Ih? Во все не вследствие разрушения сетки, а за счет ее деформации, за счет отклонения углов между связями от оптимального тетраэдрического угла θ_T .

На рис. 62 показан фрагмент сетки водородных связей во льду III. Ее отличительной особенностью является наличие большого количества пятичленных колец. В пятичленном цикле все углы между сторонами (водородными связями) никак не могут быть равны тетраэдрическому углу $109,5^\circ$. Уже поэтому ясно, что сетка водородных связей во льду III не может быть строго тетраэдрической. Структура льда Ih, у которой все углы между соседними водородными связями равны тетраэдрическому углу θ_T , обладает минимальной плотностью (наибольшей рыхлостью), возможной для четырехжды координированных сеток. При деформации такой сетки плотность неизбежно увеличивается, так что, например, для льда III она составляет $1,15 \text{ г/см}^3$, то есть на 25% больше, чем во льду Ih.

Итак, при внешних воздействиях (повышении давления) сетка водородных связей во льду не разрушается, а перестраивается, сохраняя свою четверную координацию. Более выгодным оказывается не разорвать некоторые водородные связи, а сохранить их все, лишь деформируя сетку, несколько изменяя углы между связями. В этой удивительной структурной устойчивости состоит важнейшее свойство сеток водородных связей между молекулами воды.

СТРУКТУРА ВОДЫ

Теперь легко представить себе, что происходит при плавлении льда. Сетка водородных связей и здесь не должна разрушаться, но кристаллический порядок должен исчезнуть. Это означает, что каждая молекула воды и в жидком состоянии должна сохранить свои четыре водородные связи, но углы между ними будут отличаться от θ_T , что и приводит к повышению ее плотности по сравнению со льдом Ih. Чем же отличается структура сетки водородных связей в жидкой воде от структур сеток в формах льда, стабильных при высоких давлениях? Отсутствием пространственной периодичности. В отличие от льда в водной сетке невозможно выделить участки в разных ее местах, которые были бы тождественны по структуре. Сетка в воде случайная. В ней углы между связями отклоняются от θ_T не по какому-то определенному закону, как в кристаллах, а случайно. В кристалле вокруг каждой молекулы соседние частицы расположены одинаково, в жидкости же окружение каждой молекулы устроено особым (но случайным) образом. По этой причине структуру случайной сетки невозможно установить рентгеноструктурным анализом, который вскрывает закономерности только единообразно окруженных частиц.

Значит, молекулярную структуру воды, то есть конкретное положение всех ее молекул, невозможно определить экспериментально. Здесь нужно использовать другие методы исследования и прежде всего моделирование. При помощи компьютера можно моделировать движения не очень большого ансамбля частиц (около тысячи) и получать информацию о положении каждой молекулы, если сделать определенные (модельные) предположения о законах их взаимодействия. Этой увлекательной задачей занимаются сейчас ученые во всем мире. Все исследователи согласны в том, что основой структуры является сетка водородных связей, охватывающая все молекулы воды; разногласия касаются в основном устройства этой сетки.

ПЕРЕСТРОЙКА СТРУКТУРЫ ВОДЫ

Итак, наиболее реалистической картиной структуры воды является случайная четырехжды координированная сетка водородных связей. Такая общая идея вполне достаточна для нашего обсуждения. Как объяснить с этой точки зрения аномалии воды? Всякие изменения сетки при внешних воздействиях могут быть: 1) без изменения структуры (например, изменения длин связей); 2) с изменением структуры сетки (без изменения длин связей). Удлинение всех связей при увеличении температуры относится к изменениям первого рода и является общим для всех веществ, включая воду. Но в воде существенную роль играет и второй фактор. При низких температурах структура более упорядочена, то есть углы между водородными связями в сетке в меньшей степени отклоняются от тетраэдрического угла θ_T , поэтому она более ажурна (более рыхла, имеет меньшую плотность) и ее труднее деформировать. При изменении температуры сетка перестраивается, меняет свою структуру. Это нужно понимать не только как изменение углов между связями, но и как изменение характера связности узлов сетки (молекул): например, изменение количества колец разного типа, аналогичное тому, что происходит при переходе от льда Ih к льду III. Но если при низких температурах, в кристаллической фазе структура каждой из десяти форм льда оставалась неизменной в конечном интервале температур и перестройка сетки происходила при переходе от одной дискретной формы к другой, то в жидкости структура сетки водородных связей перестраивается при изменении температуры непрерывно.

ОБЪЯСНЕНИЕ АНОМАЛИЙ

Теперь мы сможем объяснить происхождение многочисленных аномалий воды. Рассмотрим аномалии плотности. Первая — резкое увеличение плотности при плавлении льда — связана с тем, что сетка водородных связей льда сильно искажается после плавления: в водной сетке углы между связями отклоняются от оптимальных тетраэдрических,

в результате чего уменьшается объем пустого пространства между молекулами воды. Вторая определяется тепловой перестройкой структуры водной сетки. Чем ниже температура, тем ажурнее становится сетка, обуславливая уменьшение плотности при понижении температуры ниже 4°C . При высоких температурах перестройка структуры сетки уже мало влияет на плотность, поскольку сетка здесь сильно отличается от ажурной тетраэдрической конфигурации. Тогда становится видным общее для всех веществ (нормальное) явление увеличения расстояний между частицами при нагревании. Заметим, что приближение плотности воды при ее переохлаждении к плотности льда (см. рис. 1) не означает, что структура воды становится все больше похожей на структуру льда. Хотя углы между водородными связями при этом приближаются к тетраэдрическим, но структура ажурной случайной водной сетки при низких температурах не имеет ничего общего с регулярной структурой льда Ih (это хорошо видно в компьютерных моделях).

Аналогичным образом можно объяснить аномальное поведение и других свойств воды при низких температурах, например, сжимаемости (см. рис. 2). Общая причина такого аномального поведения заключается в том, что при низких температурах сетка водородных связей воды еще не очень искажена по сравнению с тетраэдрической конфигурацией, и при изменении температуры имеет первостепенное значение перестройка структуры этой сетки, которая и определяет аномальный вклад в поведение наблюдаемого нами свойства воды. При высоких температурах, когда водная сетка сильно деформирована, ее перестройка оказывает меньшее влияние на наблюдаемое свойство и вода ведет себя, как и все обычные жидкости.

Чтобы деформировать сетку при изменении температуры, перестроить ее структуру, нужно затратить энергию; это и объясняет аномальный вклад в теплоемкость. Изменение структуры сетки можно назвать изменением ее конфигурации; поэтому аномальный вклад в теплоемкость, который описывает затраты энергии на изменение структуры сетки (при увеличении температуры на один градус), называют конфигурационной теплоемкостью. Как следует из рис. 3, аномальный вклад в теплоемкость не исчезает вплоть до 100°C (при обычном давлении) и его величина мало изменяется с температурой. Это означает, что сетка водородных связей в воде существует на всем интервале существования жидкости — от точки плавления до точки кипения: с ростом температуры водородные связи не разрываются, а постепенно изменяют свою конфигурацию.

КЛАТРАТНЫЕ ГИДРАТЫ

Рассмотрим другое замечательное свойство тетраэдрических сеток. Десять форм льда и случайная квазитетраэдрическая сетка воды отнюдь

не исчерпывают всех структурных возможностей, которыми обладает сетка водородных связей. На рис. 7а показан гипотетический элемент водной сетки в форме правильного додекаэдра. Углы между сторонами пятиугольных граней в нем равны 108° ; это мало отличается от тетраэдрического угла θ_T , то есть конфигурация водородных связей в таком маленьком фрагменте должна быть очень выгодной. Однако ни в структурах льдов, ни в случайной сетке воды (в компьютерных моделях) конфигурации водородных связей в форме додекаэдра не обнаружено. Она оказывается невыгодной для структуры сетки в целом, так как внутри додекаэдра слишком велик объем пустого пространства. Этот недостаток можно устранить, если заполнить додекаэдрическую пустоту чужой частицей подходящего размера, например, атомом ксенона или молекулой метана. И действительно, такие соединения существуют в реальности. Они называются соединениями включения или клатратными гидратами (слово клатрат означает клеточный, показывая, что чужие молекулы-гости находятся в ячейках или клетках, образованных молекулами-хозяевами; в нашем случае молекулами воды). Такие клатратные структуры образуют кристаллы, плавающие при достаточно высоких температурах.

Однако правильные додекаэдры невозможно уложить так, чтобы они заполнили без зазоров все пространство. Поэтому в клатратных кристаллах додекаэдрические полости комбинируют вместе с полостями в форме четырнадцатигранника, в котором, кроме двенадцати пятиугольных граней, имеются еще две шестиугольных. Вместе они образуют красивую периодическую сетку, созданную водо-

родными связями между молекулами воды (молекулами-хозяевами), все полости которой заполнены молекулами-гостями (ксеноном или метаном; см. рис. 7б). В таком кристалле на одну полость приходится 5,75 молекул воды, то есть соотношения между количествами разных молекул (стехиометрические коэффициенты) в клатратном соединении описываются нецелыми числами. Поэтому клатратные кристаллы относятся к классу нестехиометрических соединений.

Кристалл клатратного гидрата метана при обычном давлении плавится при очень низкой температуре, но уже при давлениях выше 25 атм его температура плавления становится положительной. Следовательно, если такие кристаллы будут находиться под гнетом водного слоя толще 250 м, они могут быть вполне устойчивыми в реальных условиях. И действительно, огромные скопления клатратных гидратов метана обнаружены сейчас в недрах вдоль побережья океанов, под дном Черного моря и т.д. По современным оценкам, в виде газовых гидратов находится 10^{16} м³ метана (всего в 40 раз меньше, чем объем кислорода во всей земной атмосфере). Такие огромные запасы ценного топлива, несомненно, будут иметь большое значение в энергетике будущего.

Но возвратимся к проблемам воды. Существование стабильных кристаллов клатратных гидратов показывает нам, что сетка водородных связей воды, не теряя своей цельности, способна огигать “препятствия” в виде чужих молекул. И такие препятствия не обязательно должны быть маленькими — типа молекулы метана. Водная сетка способна огигать также и значительно большие молекулы. Они уже

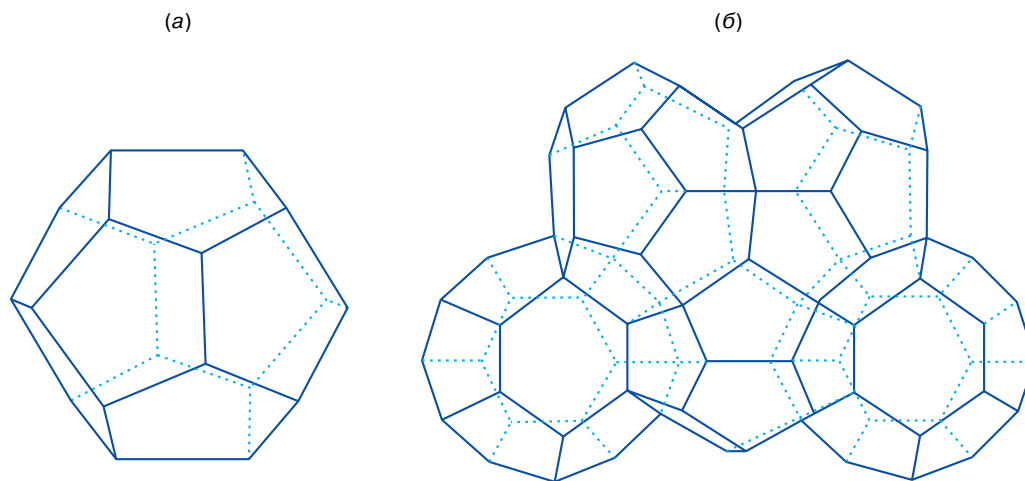


Рис. 7. а – Конфигурация водородных связей в форме правильного додекаэдра (двенадцатигранника). В каждой вершине располагается молекула воды, которая образует три водородные связи с другими молекулами додекаэдра. Четвертые водородные связи всех молекул (не показанные) направлены наружу полости и встраивают эту конфигурацию в общую сетку водородных связей; б – структура сетки водородных связей в клатратном гидрате метана. Додекаэдрическая полость (в центре) комбинируется с полостями в форме четырнадцатигранников (распознаваемым по шестиугольным граням). Молекулы метана располагаются в центрах всех полостей.

не помещаются в отдельных маленьких полостях, показанных на рис. 7б, а располагаются в нескольких соседних полостях или образуют кристаллические постройки совершенно другой структуры. Необходимо только, чтобы молекулы-гости не сильно взаимодействовали с молекулами воды и не вырывали их из сетки водородных связей. Такими свойствами обладают неполярные алифатические (метан, этан и т.д.) или ароматические (бензол) молекулы или неполярные группы в органических молекулах (например, этильный радикал в этиловом спирте). Поэтому клатратные гидратные кристаллы образуют огромное число молекул. Рассмотренные выше клатраты метана и ксенона являются лишь простейшими представителями этого класса веществ.

ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ

Способность сетки водородных связей, образованной молекулами воды, огибать чужие молекулы-препятствия не является привилегией кристаллов. Таким свойством обладает и случайная квазитетраэдрическая сетка воды. Поэтому молекулы, которые образовывали клатратные кристаллы (да и не только они), растворяясь в воде, не разрушают водную сетку водородных связей, но существенно перестраивают ее, заставляя образовывать большие полости вокруг неполярных групп. Значит, водная сетка водородных связей в водных растворах непо-

лярных молекул или молекул с неполярными группами имеет “клатратоподобное” строение (ячеистое, но не кристаллическое). Легко понять, что такая своеобразная структура водных растворов существенно отличается от обычного устройства растворов, когда молекулы растворителя и растворенного вещества случайно перемешаны. И действительно, водные растворы многих органических веществ обладают аномальными свойствами. Таким образом, особые свойства сетки водородных связей определяют аномальное поведение не только чистой воды, но и многих ее растворов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.

* * *

Юрий Исаевич Наберухин, доктор химических наук, профессор Новосибирского государственного университета. Специалист в области спектроскопии воды и водных растворов. В настоящее время занимается компьютерным моделированием неупорядоченных конденсированных сред (жидкостей и аморфных твердых тел, в частности воды). Автор более 100 научных работ и четырех монографий.