ВОДА И ЛЕД – ЗНАЕМ ЛИ МЫ О НИХ ДОСТАТОЧНО?

Ю. И. ГОЛОВИН
Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина

**WATER AND ICE:
DO WE KNOW ENOUGH ABOUT THEM?**

Yu. I. GOLOVIN

The physical properties of water and ice are described. Mechanisms of various phenomena in these substances are discussed. In spite of the long period of study and simple chemical composition, water and ice – the substances highly valuable for life on earth – harbour many mysteries because of their complicated dynamic proton and molecular structure.

Дан краткий обзор физических свойств воды и льда. Рассмотрены механизмы разнообразных явлений в них. Показано, что, несмотря на многовековую историю изучения, простейший химический состав и исключительную важность для жизни на Земле, природа воды и льда таит в себе много загадок из-за сложной динамической протонной и молекулярной структуры.

www.issep.rssi.ru

© Головин Ю.И., 2000

Хоть простота нужнее людям,
Все ж сложное понятней им.
Б.Л. Пастернак

Пожалуй, на Земле нет более распространенного и в то же время более загадочного вещества, чем вода в жидкой и твердой фазах. Действительно, достаточно вспомнить, что все живое вышло из воды и состоит из нее более чем на 50%, что 71% поверхности Земли покрыт водой и льдом, а значительная часть северных территорий суши представляет собой вечную мерзлоту. Чтобы наглядно представить себе суммарное количество льда на нашей планете, заметим, что в случае их таяния вода в Мировом океане поднимется более чем на 50 м, что приведет к затоплению гигантских территорий суши на всем земном шаре. Во Вселенной, в том числе и в Солнечной системе, обнаружены огромные массы льда. Нет ни одного мало-мальски существенного производства, бытовой деятельности человека, в которой не использовалась бы вода. В последние десятилетия обнаружены большие запасы топлива в виде твердых льдообразных гидратов природных углеводородов.

Вместе с тем после многочисленных успехов физики и физикохимии воды последних лет [1–5] вряд ли можно утверждать, что свойства этого простого вещества понятны и прогнозируемы до конца. В настоящей статье дан краткий обзор важнейших физических свойств воды и льда и нерешенных проблем, относящихся главным образом к физике их низкотемпературных состояний.

ЭТА НЕПРОСТАЯ МОЛЕКУЛА

Основы современного понимания физикохимии воды заложили около 200 лет назад Генри Кавендиш и Антуан Лавуазье, обнаружившие, что вода – это не простой химический элемент, как считали средневековые алхимики, а соединение кислорода и водорода в определенном отношении. Собственно и название свое водород (hydrogene) – рождающий воду – получил только после этого открытия, и вода приобрела современное химическое обозначение, известное теперь каждому школьнику, – H_2O.

Итак, молекула H_2O построена из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Как установлено исследованиями оптических спектров воды, в гипотетическом состоянии полного отсутствия движения (без колебаний и вращений) ионы водорода и кислорода должны занимать положения в вершинах равнобедренного треугольника с углом в вершине, занятой кислородом, 104,5° (рис. 1, *а*). В невозбужденном состоянии расстояния между ионами H^+ и O^{2-} равны 0,96 Å. Благодаря такому строению молекула воды является диполем, поскольку электронная плотность в области расположения иона O^{2-} значительно выше, чем в области ионов H^+, и простейшая модель – модель шаров – плохо подходит для описания свойств воды.

Можно представить себе молекулу воды в виде шара с двумя небольшими вздутиями в области расположения протонов (рис. 1, *б*). Однако и это не помогает понять другую особенность воды – способность образовывать между молекулами направленные водородные связи, играющие громадную роль в формировании ее разрыхленной, но вместе с тем весьма устойчивой пространственной структуры, определяющей большинство физических свойств как в жидком, так и твердом состоянии.

Напомним, что водородной называется такая связь между атомами в одной молекуле или соседними молекулами, которая осуществляется через атом водорода. Она занимает промежуточное положение между ковалентной и невалентной связью и образуется в том случае, когда атом водорода располагается между двумя электроотрицательными атомами (O, N, F и т.д.). Электрон в атоме H относительно слабо связан с протоном, поэтому максимум электронной плотности смещается к более электроотрицательному атому, а протон оголяется и начинает взаимодействовать с другим электроотрицательным атомом. При этом происходит сближение атомов O···O, N···O и т.д. на расстояние, близкое к тому, что установилось бы между ними при отсутствии атома H. Водородная связь определяет не только структуру воды, но и играет чрезвычайно важную роль в жизни биомолекул: белков, углеводов, нуклеиновых кислот и т.п.

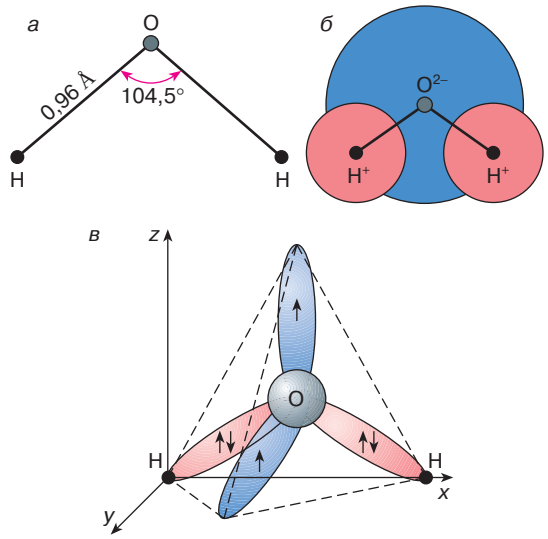

Рис. 1. Геометрическая схема (*а*), плоская модель (*б*) и пространственная электронная структура (*в*) мономера H_2O. Два из четырех электронов внешней оболочки атома кислорода участвуют в создании ковалентных связей с атомами водорода, а два других образуют сильно вытянутые электронные орбиты, плоскость которых перпендикулярна плоскости H–O–H

Очевидно, для объяснения природы воды необходимо принять во внимание электронную структуру ее молекул. Как известно, на верхней оболочке у атома кислорода находятся четыре электрона, а у водорода имеется всего лишь один электрон. В образовании каждой ковалентной связи O–H участвуют по одному электрону от атомов кислорода и водорода. Два оставшихся у кислорода электрона получили название неподеленной пары, так как в изолированной молекуле воды они остаются свободными, не участвуя в образовании связей внутри молекулы H_2O. Но при сближении с другими молекулами именно эти неподеленные электроны и играют решающую роль в образовании молекулярной структуры воды.

Неподеленные электроны отталкиваются от связей O–H, поэтому их орбиты сильно вытянуты в сторону, противоположную атомам водорода, а плоскости орбит повернуты относительно плоскости, образованной связями O–H–O. Таким образом, правильнее молекулу воды было бы изображать в трехмерном пространстве координат *xyz* в виде тетраэдра, в центре которого находится атом кислорода, а в двух вершинах – по атому водорода (рис. 1, *в*). Электронная структура молекул H_2O определяет условия их объединения в сложную трехмерную сеть водородных связей как в воде, так и во льду. Каждый из протонов может образовывать связь с неподеленным электроном другой молекулы. Первая молекула при этом выступает в качестве акцептора, а вторая – донора, образовывая водородную связь. Поскольку каждая молекула H_2O имеет два протона и два неподеленных электрона, она может одновременно образовывать четыре водородные связи с другими молекулами. Таким образом, вода является сложной ассоциированной жидкостью с динамическим характером связей, и описание ее свойств на молекулярном уровне возможно лишь с помощью квантово-механических моделей различной степени сложности и строгости.

ЛЕД И ЕГО СВОЙСТВА

С точки зрения обычного человека, лед более или менее одинаков независимо от того, где он образовывается: в атмосфере в виде градинок, на краях крыш в виде сосулек или в водоемах в виде пластин. С точки зрения физики имеется множество разновидностей льда, отличающихся своей молекулярной и мезоскопической структурой. Во льду, существующем при нормальном давлении, каждая молекула H_2O окружена четырьмя другими, то есть координационное число структуры равно четырем (так называемый лед I_h). Соответствующая кристаллическая решетка – гексагональная – не является плотноупакованной, поэтому плотность обычного льда (~0,9 г/см^3) ниже плотности воды (~1 г/см^3), для структуры которой, как показывают рентгеноструктурные исследования, среднее координационное число составляет ~4,4 (против 4 у льда I_h). Фиксированные положения в структуре льда занимают только атомы кислорода. Два атома водорода могут занимать различные положения на четырех связях молекулы H_2O с другими соседями. Ввиду гексагональности решетки кристаллики, растущие в свободном состоянии (например, снежинки), имеют шестигранную форму.

Однако гексагональная фаза далеко не единственная форма существования льда. Точное число других кристаллических фаз – полиморфных форм льда – до сих пор неизвестно. Они образуются при высоких давлениях и низких температурах (рис. 2). Одни исследователи считают точно установленным наличие 12 таких фаз, в то время как другие насчитывают их до 14. Конечно, это не единственное вещество, обладающее полиморфизмом (вспомните, например, графит и алмаз, состоящие из химически одинаковых атомов углерода), но количество различных фаз льда, которые продолжают открывать и по сегодняшний день, поражает. Все сказанное выше относилось к упорядоченному расположению ионов кислорода в кристаллической решетке льда. Что касается протонов – ионов водорода, – то, как показано методом дифракции нейтронов, в их расположении существует сильный беспорядок. Таким образом, кристаллический лед является и хорошо упорядоченной средой (по кислороду) и одновременно разупорядоченной (по водороду).

Зачастую кажется, что лед податлив и текуч. Так оно и есть, если температура близка к точке плавления (то есть $t = 0°C$ при атмосферном давлении), а нагрузка действует длительное время. Да и самый жесткий материал (например, металл) при температурах, близких к точке плавления, ведет себя аналогичным образом. Пластическая деформация льда, как, впрочем, и многих других кристаллических тел, происходит в результате зарождения и движения по кристаллу разнообразных несовершенств структуры: вакансий, межузельных атомов, межзеренных границ и, что существеннее всего, дислокаций. Как было установлено еще в 30-е годы нашего столетия, именно наличие последних предопределяет резкое снижение сопротивления кристаллических твердых тел пластической деформации (в 10^2–10^4 раз по отношению к сопротивлению идеальной решетки). К настоящему времени во льду I_h обнаружены все виды дислокаций, свойственных гексагональной структуре, исследованы их микромеханические и электрические характеристики.

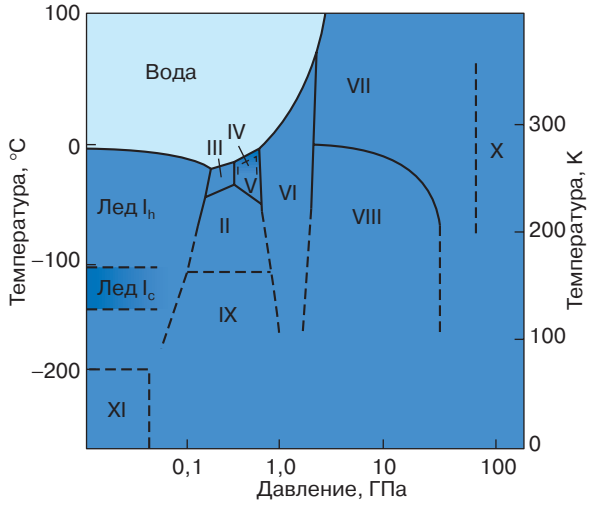

Рис. 2. Фазовая диаграмма кристаллического льда. Римскими цифрами обозначены области существования стабильных фаз. Лед IV – метастабильная фаза, располагающаяся на диаграмме внутри области V

Влияние скорости деформации на механические свойства монокристаллического льда хорошо иллюстрирует рис. 3, взятый из книги Н. Маэно [2]. Видно, что при увеличении скорости деформирования механические напряжения σ, необходимые для пластического течения, быстро нарастают и на зависимости относительной деформации E от σ появляется гигантский зуб текучести.

Не менее замечательны и электрические свойства льда. Величина проводимости и ее экспоненциально быстрое возрастание с повышением температуры резко отличают лед от металлических проводников и ставят его в один ряд с полупроводниками. Обычно лед бывает очень чист химически, даже если растет из грязной воды или раствора (вспомните чистые прозрачные льдинки в грязной луже). Это обусловлено низкой растворимостью примесей в структуре льда. В результате при замерзании примеси оттесняются на фронте кристаллизации в жидкость и не входят в структуру льда. Именно поэтому свежевыпавший снег всегда белый, а

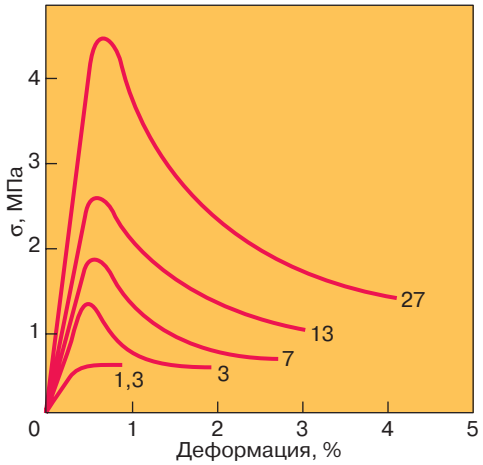

Рис. 3 (по [2]). Кривые напряжения – относительная деформация для монокристалла льда I_h при $t = -15°C$ (скольжение вдоль базисной плоскости, ориентированной под углом 45° к оси сжатия). Цифры на кривых означают величину скорости относительной деформации $\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell}\Delta\tau$ ($\Delta\ell$ – изменение длины образца ℓ за время $\Delta\tau$) в единицах 10^{-7} c^{-1}

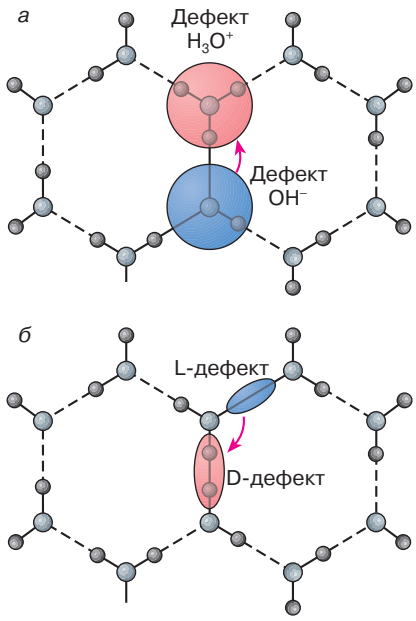

Рис. 4. Схема образования дефектов в протонной подсистеме льда: *а* – пара ионных дефектов H_3O^+ и OH^-; *б* – пара ориентационных дефектов Бьеррума D и L

вода из него отличается исключительной чистотой. Природа мудро предусмотрела гигантскую очистительную станцию для воды в масштабе всей атмосферы Земли. Поэтому рассчитывать на большую примесную проводимость (как, например, в легированном кремнии) во льду не приходится. Но в нем нет и свободных электронов, как в металлах. Лишь в 50-е годы XX века было установлено, что носителями заряда во льду являются неупорядоченные протоны, то есть лед является протонным полупроводником.

Упоминавшиеся выше перескоки протонов создают в структуре льда дефекты двух типов: ионные и ориентационные (рис. 4). В первом случае перескок протона происходит вдоль водородной связи от одной молекулы H_2O к другой (рис. 4, *а*), в результате чего образуется пара ионных дефектов H_3O^+ и OH^-, а во втором – на соседнюю водородную связь в одной молекуле H_2O (рис. 4, *б*), в результате чего возникает пара ориентационных дефектов Бьеррума, получивших название L- и D-дефектов (от нем. leer – пустой и doppelt – двойной). Формально такой перескок можно рассматривать как поворот молекулы H_2O на 120°.

Протекание постоянного тока за счет перемещения только ионных или только ориентационных дефектов невозможно. Если, например, по какому-либо участку сетки прошел ион H_3O^+, то следующий такой же ион по этому же пути пройти не сможет. Однако если пропустить по этому пути D-дефект, то расположение протонов вернется к исходному и, следовательно, сможет пройти и следующий ион H_3O^+. Аналогично ведут себя дефекты OH^- и L. Поэтому электропроводность химически чистого льда ограничивается теми дефектами, которых меньше, а именно ионными. Диэлектрическая поляризация, напротив, обусловлена более многочисленными ориентационными дефектами Бьеррума. В действительности при приложении внешнего электрического поля оба процесса идут параллельно, что позволяет льду проводить постоянный ток и в то же время испытывать сильную диэлектрическую поляризацию, то есть проявлять одновременно и свойства полупроводника и свойства изолятора. В последние годы не прекращаются попытки обнаружить при низких температурах у чистого льда сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические свойства как в объеме, так и на межфазных границах. Полной уверенности в их существовании пока нет, хотя обнаружено несколько псевдопьезоэффектов, связанных с наличием дислокаций и других структурных дефектов.

ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛЬДА

В связи с развитием полупроводниковой техники, микроминиатюризацией элементной базы и переходом к планарным технологиям интерес к физике поверхности в последнее десятилетие сильно возрос. Было разработано множество тонких методик исследования

приповерхностных состояний в твердых телах, оказавшихся полезными в исследовании и металлов, и полупроводников, и диэлектриков. Однако структура и свойства поверхности льда, граничащей с паром или жидкостью, остается во многом неясной. Одна из наиболее интригующих гипотез, выдвинутая еще М. Фарадеем, заключается в существовании на поверхности льда квазижидкого слоя толщиной в десятки-сотни ангстрем даже при температуре значительно ниже точки плавления. Основанием для этого являются не только умозрительные построения и теории структуры приповерхностных слоев из сильно поляризованных молекул H_2O, но и тонкие определения (методом ядерного магнитного резонанса) фазового состояния поверхности льда, а также его поверхностной проводимости и ее зависимости от температуры. Однако в большинстве практически важных случаев свойства поверхности снега и льда, скорее всего, определяются наличием макроскопической водяной пленки, а не квазижидкого слоя.

Плавление приповерхностных слоев льда под действием солнечного света, более теплой атмосферы или скользящего по нему твердого тела (коньки, лыжи, полозья санок) имеет решающее значение для реализации низкого коэффициента трения. Низкое трение скольжения не результат понижения температуры плавления под действием повышенного давления, как часто думают, а следствие выделения теплоты трения. Расчет показывает, что эффект давления даже в случае скольжения остро наточенного конька по льду, под которым развивается давление около 1 МПа, приводит к понижению температуры плавления всего лишь на ~0,1°С, что не может оказать существенного влияния на величину трения.

Установившейся традицией в описании свойств воды и льда являются констатация и обсуждение множества аномальных свойств, выделяющих это вещество среди гомологов (H_2S, H_2Se, H_2Te). Едва ли не самым важным является очень высокая (среди простых веществ) удельная теплота плавления (кристаллизации) и теплоемкость, то есть лед трудно растопить, а воду – заморозить. В результате климат на нашей планете в целом достаточно мягок, но при отсутствии воды (например, в пустынях жаркой Африки) контраст между дневной и ночной температурами значительно выше, чем на побережье океана на той же широте. Жизненно важным для биосферы является свойство увеличиваться в объеме при кристаллизации, а не уменьшаться, как это делает абсолютное большинство известных веществ. В результате лед плавает в воде, а не тонет и сильно замедляет промерзание водоемов в холодное время, защищая все живое, укрывающееся в нем на зиму. Этому также способствует и немонотонное изменение плотности воды при понижении температуры до 0°С – одно из наиболее известных аномальных свойств воды, обнаруженное более 300 лет тому назад. Максимум плотности достигается при $t = 4$°С, и это предотвращает опускание на дно приповерхностных слоев воды, остывших до температуры ниже 4°С. Конвективное перемешивание жидкости блокируется, что сильно замедляет дальнейшее охлаждение. Достаточно давно известны и другие аномалии воды: сдвиговой вязкости при 20°С, удельной теплоемкости при 40°С, изотермической сжимаемости при 46°С, скорости распространения звука при 60°С. Вязкость воды с ростом давления уменьшается, а не увеличивается, как у других жидкостей. Ясно, что аномальные свойства воды обусловлены структурными особенностями ее молекулы и спецификой межмолекулярных взаимодействий. Полной ясности в отношении последних до сих пор не достигнуто. Описанные выше свойства относятся к воде, льду и границе раздела между ними, существующим в условиях термодинамического равновесия. Задачи совсем другого уровня сложности возникают при попытке описания динамики фазового перехода вода–лед, особенно в условиях, далеких от термодинамического равновесия.

Термодинамической причиной любого фазового перехода является разность химических потенциалов частиц по одну и другую сторону от межфазной границы $\Delta\mu = \mu_1 - \mu_2$. Химическим потенциалом μ называют функцию состояния, которая определяет изменения термодинамических потенциалов при изменении числа N частиц в системе, то есть $\mu = G/N$, где $G = H - TS$ – термодинамический потенциал Гиббса, H – энтальпия, S – энтропия, T – температура. Разность термодинамических потенциалов является движущей силой макроскопического процесса (как разность электрических потенциалов на концах проводника является причиной электрического тока). При $\mu_1 = \mu_2$ обе фазы могут сосуществовать в равновесии как угодно долго. При нормальном давлении химический потенциал воды уравнивается с химическим потенциалом льда при $t = 0$°С. При $t < 0$°С более низким химическим потенциалом обладает лед, но это еще не означает, что при любом, самом маленьком переохлаждении начнется кристаллизация. Опыт показывает, что тщательно очищенный от примесей, обезгаженный, деионизированный расплав может быть переохлажден относительно точки равновесия фаз на десятки кельвин (а для некоторых веществ и на сотни). Анализ показывает, что причина заключается в отсутствии зародышей новой фазы (центров кристаллизации, конденсации, парообразования и т.д.).

Зародыши могут образоваться и гомогенно, то есть из самой среды, находящейся в метастабильном состоянии, но для этого должны быть выполнены

определенные условия. Начнем рассмотрение ситуации с учета того, что любая граница раздела между кристаллом и расплавом (или паром, раствором) вносит дополнительную энергию $S\alpha$, где S – площадь границы, α – поверхностная энергия. Кроме того, N молекул, образовавших зародышевый кристаллик, обладают энергией, меньшей, чем в жидкости, на $N\Delta\mu$. В результате полное изменение энергии в системе при появлении зародыша $\Delta U = -N\Delta\mu + S\alpha$ окажется немонотонно зависящим от N. Действительно, при сферической форме зародыша $S = 4\pi R^2 = 4\pi\left(NV \cdot \frac{3}{4\pi}\right)^{2/3} = AN^{2/3}$, где $A = (36\pi V^2)^{1/3}$ V – объем, приходящийся на одну молекулу в кристалле. Из предыдущего следует, что ΔU достигает максимума $\Delta U_c = -N_c\Delta\mu + AN_c^{2/3}\alpha$, когда в зародыше находится $N_c = (2A\alpha/3\Delta\mu)^3$ молекул.

Таким образом, при последовательном присоединении молекул к зародышу система сначала должна взбираться на вершину потенциального холма высотой ΔU_c, зависящей от переохлаждения, после чего дальнейший рост N в кристаллике будет идти с понижением энергии, то есть облегченно. Казалось бы, чем ниже температура жидкости, то есть чем сильнее переохлаждение, тем быстрее должна идти кристаллизация. Так оно и есть на самом деле при не слишком больших переохлаждениях. Однако с падением t экспоненциально быстро нарастает и вязкость жидкости, затрудняющая движение молекул. Вследствие этого при больших степенях переохлаждения процесс кристаллизации может затянуться на много лет (как в случае со стеклами различного происхождения).

Численные оценки показывают, что для воды при обычных в природных условиях степенях переохлаждения (Δt = 1–10°C) зародыш должен состоять из нескольких десятков молекул, что значительно больше координационного числа в жидкой фазе (~4,4). Таким образом, системе требуется большое количество флуктуационных попыток, чтобы взобраться на вершину энергетического холма. В не очень тщательно очищенной воде сильному переохлаждению препятствует наличие уже существующих центров кристаллизации, которыми могут стать частицы примесей, пылинки, неровности стенок сосуда и др. В последующем кинетика роста кристалла зависит от условий теплопередачи вблизи межфазной границы, а также от морфологии последней на атомарно-молекулярном уровне.

У сильно переохлажденной воды имеются две характерные температуры $t_h = -36$°C и $t_g = -140$°C. Хорошо очищенная и обезгаженная вода в интервале температур 0°C > t > t_h длительное время может оставаться в состоянии переохлажденной жидкости. При $t_g < t < t_h$ происходит гомогенное зарождение кристалликов льда, и вода не может находиться в переохлажденном состоянии при любой степени очистки. В условиях достаточно быстрого охлаждения при $t < t_g$ подвижность молекул воды настолько падает (а вязкость растет), что она образует стеклообразное твердое тело с аморфной структурой, свойственной жидкостям. При этом в области невысоких давлений образуется аморфная фаза низкой плотности, а в области повышенных – аморфная фаза высокой плотности, то есть вода демонстрирует полиаморфизм. При изменениях давления или температуры одна аморфная фаза скачком переходит в другую с неожиданно большим изменением плотности (>20%).

Существует несколько точек зрения на природу полиаморфизма воды. Так, согласно [5], такое поведение сильно переохлажденной воды может быть объяснено, если принять, что в потенциальном профиле взаимодействия двух молекул H_2O имеется не один минимум,

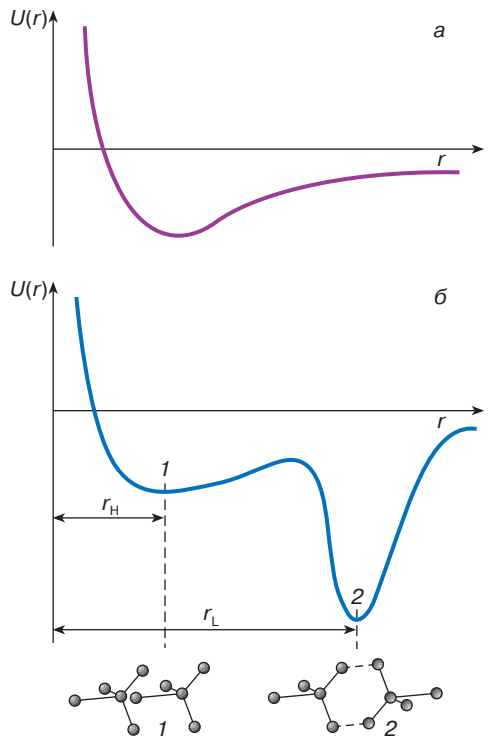

Рис. 5 (по [5]). Гипотетические потенциальные профили: *а* – с одним минимумом энергии (например, потенциал Леннарда-Джонса $U(r) = A/r^6 - B/r^{12}$) и *б* – с двумя минимумами энергии, которым соответствуют две устойчивые конфигурации кластера из двух взаимодействующих молекул воды (*1* и *2*) с разными расстояниями между условными центрами молекул r_H и r_L; первая из них соответствует фазе с большей плотностью, вторая – с меньшей

а два (рис. 5). Тогда аморфной фазе с высокой плотностью будет соответствовать среднее расстояние r_H, а фазе с низкой плотностью – r_L. Компьютерное моделирование подтверждает такую точку зрения, но надежных экспериментальных доказательств этой гипотезы пока нет, как нет и строгой теории, подтверждающей обоснованность использования двухъямного потенциала для описания столь необычных свойств переохлажденной воды.

Поведение переохлажденной воды представляет большой интерес в силу различных причин. В частности, оно определяет климатические условия, возможность и режим судоходства в высоких широтах, что актуально для нашей страны. В процессе динамической кристаллизации на межфазной границе происходит множество интересных и пока малоизученных явлений, например перераспределение примесей, сепарация и последующая релаксация электрических зарядов, сопровождающаяся электромагнитным излучением в широкой полосе частот, и др. Наконец, кристаллизация в сильно переохлажденной жидкости – прекрасная, легко воспроизводимая многократно модельная ситуация поведения системы, далекой от термодинамического равновесия и способной в результате развития неустойчивостей к образованию дендритов различного порядка и размерности (типичные представители – снежинки и ледяные узоры на окнах), удобной для создания и моделирования поведения фракталов [6].

Процессы таяния льда на первый взгляд кажутся легче для анализа, чем процессы кристаллизации. Однако и они оставляют множество вопросов. Так, например, широко распространено мнение, что талая вода некоторое время обладает свойствами, отличными от свойств воды обычной, по крайней мере по отношению к биологическим объектам: растениям, животным, человеку. Вероятно, эти особенности могут быть обусловлены высокой химической чистотой (из-за отмеченного малого коэффициента захвата примесей в процессе кристаллизации льда), различиями в содержании растворенных газов и ионов, а также запоминанием структуры льда в многомолекулярных кластерах жидкой фазы. Однако достоверной информации об этом, полученной современными физическими методами, у автора нет.

Не менее сложным представляется анализ механизмов влияния внешних физических полей, в частности магнитного, на процессы и свойства воды, льда и фазовых переходов. Вся наша жизнь протекает в условиях постоянного действия магнитного поля Земли и его слабых флуктуаций. В течение многих веков развиваются магнитобиология и магнитные методы лечения в медицине. Наконец, серийно производятся и широко применяются установки для омагничивания воды, используемой для полива в сельском хозяйстве (в целях повышения урожайности), питания паровых котлов (для уменьшения скорости образования накипи в них) и т.д. Однако сколько-нибудь удовлетворительного физического описания механизмов действия магнитного поля в этих и других подобных случаях до сих пор нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вода, лед и их взаимные фазовые превращения еще таят в себе множество загадок. Их разгадывание представляет собой не только очень интересную физическую проблему, но и чрезвычайно важно для жизни на Земле, так как имеет прямое отношение к здоровью и благополучию человека. Возможно, они дают один из самых ярких примеров роли электронной и молекулярной структуры в формировании физических свойств при простейшем и хорошо известном химическом составе вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богородский В.В., Гаврило В.П.* Лед. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 384 с.
2. *Маэно Н.* Наука о льде. М.: Мир, 1988. 231 с.
3. *Hobbs P.V.* Ice Physics. Oxford: Univ. Press, 1974. 864 p.
4. *Зацепина Г.Н.* Физические свойства и структура воды. М.: Изд-во МГУ, 1998. 184 с.
5. *Mishima O., Stanley E.* The Relationship between Liquid, Supercooled and Glassy Water // Nature. 1998. Vol. 396. P. 329–335.
6. *Золотухин И.В.* Фракталы в физике твердого тела // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 7. С. 108–113.

Рецензент статьи Б.А. Струков

* * *

Юрий Иванович Головин, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической и экспериментальной физики Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов – электронная структура дефектов твердых тел и обусловленные ими макроскопические свойства. Автор и соавтор более 200 научных работ, в том числе монографии и 40 изобретений.