

рении воды. Удельная теплота испарения воды при атмосферном давлении равна 2,3 МДж/кг, причем из этой величины примерно 0,17 МДж/кг приходится на работу, которую расширяющийся водяной пар совершает против сил атмосферного давления (на разрыв связей остается 2,13 МДж/кг). Удельная теплота плавления льда равна 0,34 МДж/кг. Количество теплоты, которое нужно, чтобы нагреть 1 кг воды на 100°C, равно 0,42 МДж/кг, причем из этого количества только около одной четверти приходится на недостающую часть теплоемкости (примерно 0,107 МДж/кг). По нашим оценкам получается, что на разрыв всех связей тратится приблизительно 2,56 МДж/кг.

Итак, по мере нагрева сначала 13% связей рвутся при таянии льда, затем 4% связей рвутся в процессе нагрева воды от 0°C до 100°C, а оставшиеся 83% связей рвутся при испарении воды. Случайное совпадение – 0,04% связей рвутся при нагреве воды на 1 кельвин – привело к тому, что жидкая вода формально подчиняется закону Дюлонга и Пти.

Самый существенный вывод, который можно сделать на основе проведенных оценок, таков: структура воды в диапазоне температур от 0°C до 100°C более чем на 80% повторяет структуру льда. Если учесть, что на одну водородную связь приходится примерно  $2 \cdot 10^4$  Дж/моль энергии, то при испарении воды тратится столько энергии, что на каждую испарившуюся молекулу приходится примерно по 2 разорванные водородные связи. Это означает, что молекулы в жидкой воде в среднем занимают положения и ориентации, соответствующие тетраэдрической пространственной структуре типа алмаза. (Экспериментальные данные, полученные с помощью рентгеноструктурного анализа, нейтронографии и других физических методов, позволяют утверждать, что трехмерная приближенно тетраэдрическая сетка водородных связей существует и у льда, и у жидкой воды.)

### Аномалия плотности воды

Как известно, вода при атмосферном давлении в диапазоне температур от 0°C до 4°C увеличивает свою плотность. По-видимому, при 0°C в жидкой воде имеется очень много островков с сохранившейся структурой льда. Каждый из этих островков при дальнейшем увеличении температуры испытывает тепловое расширение, но одновременно с этим уменьшаются количество и размеры этих островков вследствие продолжающегося разрушения их структуры. При этом часть объема воды между островками имеет другой коэффициент расширения. К сожалению, этот коэффициент невозможно измерить отдельно. Однако можно попытаться его оценить косвенными методами. Из данных справочника известно, что скорость звука в воде при 273 К примерно в 2,5 раза меньше, чем скорость продольных звуковых волн во льду. Тепловое расширение происходит вследствие повышения средней энергии поступательного движения молекул и должно быть обратно пропорционально жесткости материала или прямо пропорционально его сжимаемости. Скорость

звука пропорциональна корню квадратному из отношения жесткости материала (модуля Юнга) к его плотности (плотности воды и льда практически совпадают). В структуре воды по сравнению со структурой льда изменилось только 13%, а скорость звука упала в 2,5 раза, следовательно, сжимаемость межостровковой воды примерно в  $(2,5)^2/0,13 = 48$  раз больше сжимаемости льда.

Попробуем оценить, на сколько должен был бы измениться объем жидкости за счет разрыва 0,04% связей (нагрев от 0°C на 1°C), если предположить, что тенденция к уменьшению объема за счет разрыва связей будет такая же, как и при таянии льда, а тенденция к расширению объема островков будет такой же, как у твердого льда вблизи температуры плавления. Учтем также расширение межостровковой воды. При таянии льда плотность увеличивается на 9% (при этом порвались всего 13% связей); значит, увеличение плотности при разрыве 0,04% связей должно составить величину порядка +0,028%. Лед при нагреве на 1 градус вблизи температуры 273 К расширяется в объеме на 0,016%; значит, плотность должна уменьшиться на 0,87 от этой величины (–0,014%). Расширение водной межостровковой части при нагреве на один градус приведет к изменению плотности на  $-48 \cdot 0,13 \cdot 0,016\% = -0,01\%$ . Итоговая оценка дает +0,004%, а на самом деле плотность воды при повышении температуры на один градус выше точки плавления изменяется на +0,006%, т.е. примерно в полтора раза больше. Сложность ситуации состоит в том, что вклады противоположного знака имеют близкие абсолютные величины. В таких случаях принято говорить, что порядок полученной оценки близок к тому, что наблюдается на самом деле (отличается меньше чем на единицу), а с учетом грубости исходных предположений можно считать, что порядки величин просто совпадают.

### Вязкость воды

Еще одна физическая величина, связанная со структурой воды, имеет особенную зависимость от температуры – это вязкость.

Вязкость воды уменьшается при изменении температуры от 0°C до 100°C в семь раз, тогда как вязкости большинства жидкостей с неполярными молекулами, не имеющими, соответственно, водородных связей, уменьшаются при таком же изменении температур всего в два раза! Спирты, молекулы которых являются полярными, как и молекула воды, тоже изменяют вязкость в 5–10 раз при таком изменении температур.

Исходя из нашей оценки количества разорванных связей при нагревании воды от 0°C до 100°C (порядка 4%), следует признать, что подвижность воды и ее малая вязкость обеспечиваются весьма малой долей всех молекул.

\*\*\*

Таким образом, необычное поведение различных характеристик воды при изменении температуры от 0°C до 100°C говорит о ее уникальных свойствах и дает повод думать, что Природа неспроста использовала воду в качестве элемента биологических структур, который не может быть заменен никаким другим растворителем.