

Кристаллические и аморфные тела. Механические свойства твердых тел

■ ■ ■

Сходства и отличия. В физике твердыми обычно называют только кристаллические тела. Аморфные тела, хотя и могут быть твердыми в обыденном смысле, рассматриваются как очень вязкие жидкости. Они не имеют определенной температуры плавления, при нагревании постепенно размягчаются, вязкость их уменьшается. Кристаллические тела имеют определенную температуру плавления, неизменную при постоянном давлении. Свойства аморфных тел одинаковы по всем направлениям: *аморфные тела изотропны*. Свойства кристаллов неодинаковы по различным направлениям: *кристаллы анизотропны*. Скорость распространения света, коэффициенты теплопроводности, модуль упругости и многие другие физические свойства кристалла зависят от их направления в нем.

Аморфные тела. В отличие от кристаллических тел, которые характеризуются дальним порядком, т. е. правильной повторяемостью расположения атомов на больших расстояниях, аморфные тела, подобно жидкостям, обладают лишь ближним порядком. Некоторые вещества могут находиться и в кристаллическом, и в аморфном состояниях. Пример такого вещества — двуокись кремния SiO_2 .

Особенно сильно отличаются кристаллические и аморфные тела по своим тепловым свойствам. Кристаллические тела обладают вполне определенной температурой плавления, а аморфные тела ее не имеют. При нагревании аморфное тело постепенно размягчается, его молекулы все легче и легче меняют “своих ближайших соседей”, вязкость его уменьшается, и при достаточно высокой температуре оно может вести себя как маловязкая жидкость. Следовательно, *твердые аморфные тела можно рассматривать как очень вязкие жидкости. Они полностью изотропны.*

Многие вещества могут быть переведены из аморфного состояния в кристаллическое, и наоборот. Так, обычное аморфное стекло после выдержки при определенной температуре “расстекловывается” — превращается в мелкие кристаллики и становится мутным, непрозрачным.

Кристаллы. Обычно вещество называют *твердым*, если оно сохраняет свою форму и свой объем. Однако это лишь внешние признаки, характеризующие твердое состояние вещества. С физической точки зрения наличие этих признаков не дает возможности четко разграничить твердое и жидкое состояния вещества.

При изучении твердых веществ было обнаружено, что многие твердые тела в природе имеют гладкие плоские поверхности, расположенные под определенными углами, а иногда и форму правильных многогранников. Такие твердые тела называют **монокристаллами** (от греч. *моно* — “один”). Чаще всего они имеют очень маленькие размеры, хотя, например, монокристаллы горного хрусталя иногда бывают размером с человеческий рост.

Изучение внутреннего строения кристаллов с помощью рентгеновского излучения позволило установить, что частицы в кристаллах (молекулы, атомы, ионы) имеют правильное расположение, т. е. образуют *кристаллическую (пространственную) решетку*. Точки в кристаллической решетке, соответствующие наиболее устойчивому положению равновесия частиц твердого тела, называются **узлами решетки**.

Правильное расположение частиц в узлах решетки кристалла называют дальним порядком в расположении частиц.

Итак, в физике под **твердыми телами** подразумевают только такие вещества, у которых имеется кристаллическое строение. Иначе говоря, у твердого тела обязательно должен быть дальний порядок в расположении его частиц.

Пространственная решетка. Правильное расположение частиц в решетке кристалла является причиной *анизотропии кристаллов: зависимость каких-либо свойств кристаллов от направления.*

У многих кристаллов очень ярко выражена зависимость механической прочности кристалла от направления. Например, слюда легко расщепляется на пластинки, каменная соль раскалывается на кубики и т. д. Особенно заметна эта зависимость у графита. В каждом слое кристалла графита атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников (рис. 47.1), а расстояние между соседними слоями в 2,5 раза больше, чем расстояние между ближайшими атомами углерода в каждом слое. Поэтому слои в кристалле графита легко сдвигаются относительно друг друга. Соскальзыванием слоев графита мы пользуемся, когда пишем карандашом. Это же свойство графита позволяет применять его как смазочный материал (особенно часто его используют при высоких температурах).

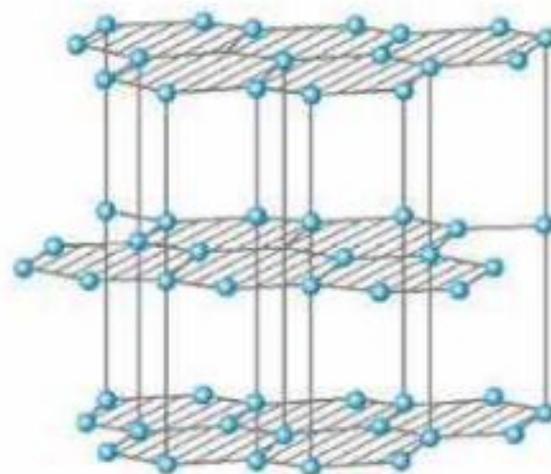


Рис. 47.1

Если на поверхность кристалла кварца нанести слой воска и коснуться концом сильно нагретой проволоки середины грани кристалла



Рис. 47.2

(рис. 47.2), то воск расплавляется по эллипсу. Значит, теплопроводность кристалла кварца зависит от направления. Опыты показывают зависимость от направления и многих других свойств кристаллов.

Анизотропией обладают только монокристаллы. Большинство твердых веществ имеют *поликристаллическое строение* (от греч. *поли* — “много”), т. е. они состоят из

множества очень мелких кристалликов, иногда различимых только в микроскоп. Поскольку эти кристаллики относительно друг друга расположены хаотично, твердое тело в целом является изотропным, т. е. имеет одинаковые свойства по всем направлениям, хотя каждый отдельный кристаллик обладает анизотропией. Аморфные тела тоже изотропны, так как у них нет правильной пространственной решетки.



Различие между поликристаллическими и аморфными телами в этом отношении заключается в том, что у поликристаллических тел всегда можно выделить достаточно малую часть тела, в которой обнаружится анизотропия, а аморфные вещества изотропны при любых размерах тела или его части.

Опыт показал, что идеального дальнего порядка в расположении частиц твердого вещества на практике никогда не встречается. Любые отступления от идеального порядка в кристалле называют *дефектами пространственной решетки*. Одним из важнейших дефектов решетки является нарушение правильного расположения частиц кристалла в каждый момент времени, обусловленное тепловым движением этих частиц.

Дефекты решетки в кристаллах сильно влияют на многие свойства твердых тел, например, на прочность, пластичность, электрическую проводимость и т. д.

Виды кристаллических структур. Различные типы кристаллов и возможное расположение узлов в пространственной решетке изучает *кристаллография*. В физике кристаллические структуры рассматривают не с точки зрения их геометрии, а по характеру сил, действующих между частицами кристалла, т. е. по типу связей между частицами, находящимися в узлах решетки кристалла. Различают четыре типичные кристаллические структуры: *ионную*, *атомную*, *молекулярную* и *металлическую*. Выясним, в чем заключается сущность различия между этими структурами.



Рис. 47.3

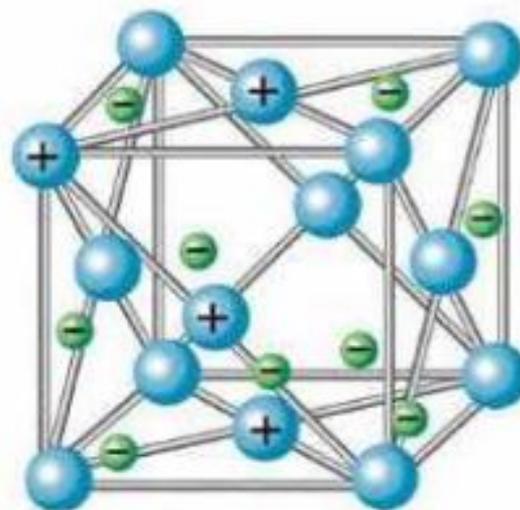


Рис. 47.4

■ ■ ■

Атомная кристаллическая структура характеризуется наличием нейтральных атомов в узлах решетки, между которыми имеется ковалентная связь. **Ковалентной** называется такая связь, при которой *каждые два соседних атома удерживаются рядом силами притяжения, возникающими при взаимном обмене двумя валентными электронами между этими атомами.* Оба валентных электрона (по одному от каждого атома) обобществляются, т. е. принадлежат обоим атомам одновременно, и большую часть времени проводят между атомами, связывая их в молекулу (рис. 47.3, а, б). Примером такого рода молекул являются молекулы H_2 , N_2 и т. п. Ковалентная связь также соединяет в молекулы разные атомы: H_2O , NH_3 , SO_2 , CH_4 , SiO_2 и т. д.

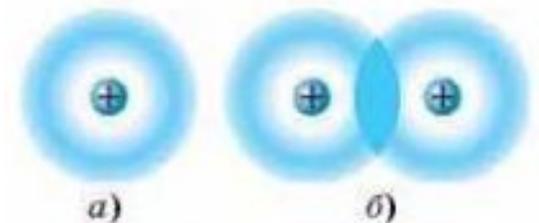


Рис. 47.3

Молекулярная кристаллическая структура отличается пространственной решеткой, в узлах которой находятся нейтральные молекулы вещества. Силами, удерживающими молекулы в узлах этой решетки, являются силы межмолекулярного взаимодействия.

Металлическая кристаллическая структура (рис. 47.4) отличается наличием в узлах

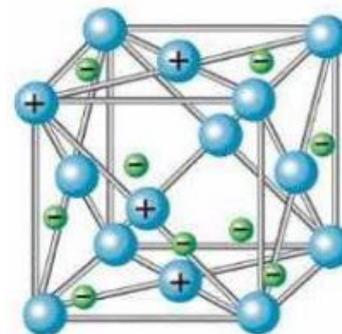


Рис. 47.4

решетки положительно заряженных ионов металла. У атомов всех металлов *валентные электроны*, т. е. наиболее удаленные от ядра, слабо связаны с атомами. Электронные облака таких периферийных электронов перекрывают сразу много атомов в кристаллической решетке металла. Это означает, что валентные электроны в кристаллической решетке металла не могут принадлежать одному и даже двум атомам, а обобществляются сразу многими атомами. Такие электроны практически могут беспрепятственно двигаться между атомами.

В первом приближении хаотическое движение свободных электронов в металле можно считать подобным движению молекул идеального газа. Поэтому *совокупность свободных электронов в металле иногда называют электронным газом* и при расчетах применяют к нему формулы, выведенные для идеального газа. Существованием электронного газа в металлах объясняются как высокая теплопроводность, так и высокая электрическая проводимость всех металлов.

Виды деформации. Изменение формы или объема тела под действием приложенных сил называется **деформацией**.

Если к торцам стержня приложить силы F_1 и F_2 , направленные вдоль его оси, но в противоположные стороны, то он будет или растягиваться, или сжиматься. Пунктиром отмечены начальные размеры тела. Увеличение длины тела под действием сил, растягивающих его в одном направлении, называется **деформацией продольного растяжения** (рис. 48.1, а). Уменьшение длины тела под действием сил, сжимающих его в одном направлении, называется **деформацией продольного сжатия** (рис. 48.1, б). При этих деформациях одновременно происходит небольшое изменение площади поперечного сечения тела.

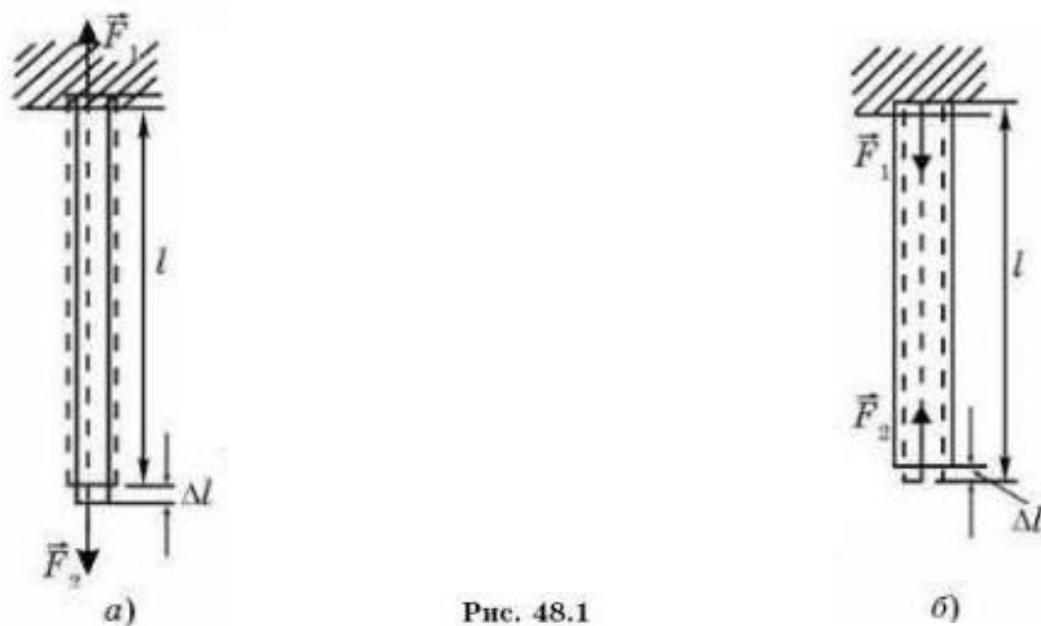


Рис. 48.1

Увеличение объема тела под действием сил, растягивающих его по всем направлениям, называется **деформацией всестороннего растяжения**. Уменьшение объема тела под действием сил, сжимающих его по всем направлениям, называется **деформацией всестороннего сжатия**.

Если закрепить один конец стержня, а к свободному концу приложить силу F , перпендикулярную оси (рис. 48.2, а), то стержень изгибается. Стержень на двух опорах под действием поперечной силы F , приложенной между опорами, прогибается (рис. 48.2, б). **Изгиб стержня под действием сил, перпендикулярных его оси, называется деформацией поперечного изгиба**. При изгибе выпуклая сторона стержня удлиняется (растягивается), а вогнутая — укорачивается (сжимается).

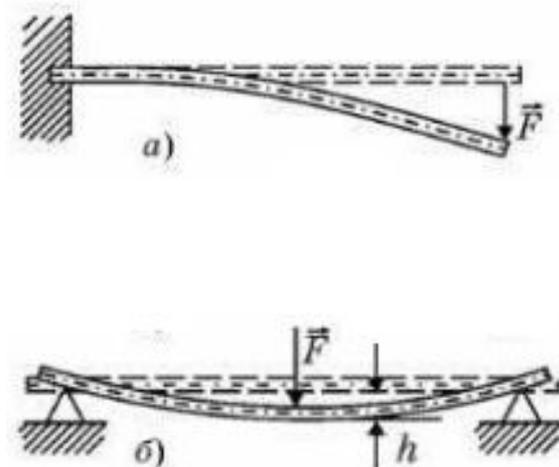


Рис. 48.2

Прикладывая к торцам стержня две пары сил, поворачивающих торцы в противоположные стороны (рис. 48.3), можно обнаружить скручивание стержня. При этом происходит поворот верхних слоев стержня относительно нижних. *Поворот параллельных слоев тела относительно друг друга под действием двух пар сил называется деформацией кручения.*

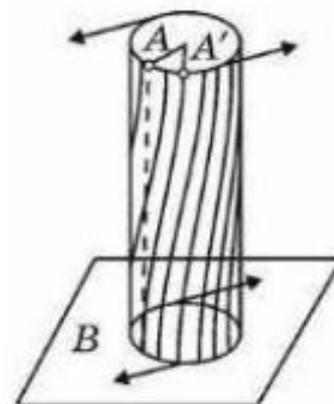


Рис. 48.3

Закрепим брусок и приложим к нему силу F_1 , стремящуюся его сдвинуть (рис. 48.4). В месте закрепления бруска возникает такая же по модулю и обратная по направлению сила F_2 . Действие этих сил вызовет перекося бруска на некоторый угол α . При этом верхние слои бруска сдвигаются относительно нижних. *Сдвиг параллельных слоев тела относительно друг друга под действием сил, параллельных этим слоям, называется деформацией сдвига.*

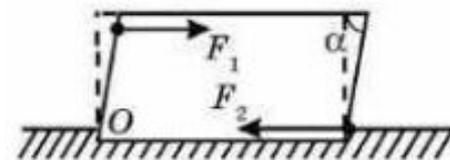


Рис. 48.4

Каждая из описанных выше деформаций может быть большой или маленькой. Любую из них можно оценивать *абсолютной деформацией* Δa — числовое изменение какого-либо размера тела под действием сил. Например, при одностороннем растяжении (сжатии) тела абсолютной деформацией является изменение длины тела Δl (рис. 48.5), при всестороннем растяжении (сжатии) — изменение объема ΔV и т. д.

Однако более наглядной оценкой изменения объема или формы тела под действием приложенных сил является *относительная деформация* ε (греч. *эпсилон*). *Относительной деформацией* называется физическая величина, показывающая, какую часть от первоначального размера тела a составляет абсолютная деформация Δa :

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a}. \quad (48.1)$$

Например, при одностороннем растяжении (сжатии) получим:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (48.2)$$

При сдвиге относительной деформацией служит tga (рис. 48.4):

$$\varepsilon = \operatorname{tga}. \quad (48.3)$$

Механическое напряжение. Выделим мысленно в деформированном стержне, изображенном на рисунке 48.1, a , тонкий слой, перпендикулярный оси стержня (рис. 48.5). Он разделит стержень на две части. Поскольку все части стержня находятся в равновесии, верхняя часть

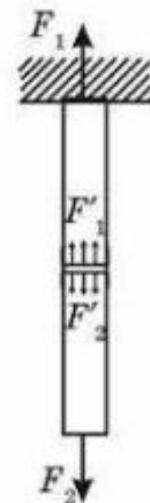


Рис. 48.5

Механическое напряжение. Выделим мысленно в деформированном стержне, изображенном на рисунке 48.1, *a*, тонкий слой, перпендикулярный оси стержня (рис. 48.5). Он разделит стержень на две части. Поскольку все части стержня находятся в равновесии, верхняя часть действует на выделенный слой с силой F_1' , равной F_1 (если пренебречь весом стержня), а нижняя часть — с силой F_2' , равной F_2 . Эти силы, возникающие внутри деформируемого тела, называются *внутренними силами*. Они вызывают деформацию каждого элемента тела (в нашем примере — растяжение).

Если стержень однородный и внешние силы F_1 и F_2 действуют по оси стержня, то внутренние силы F_1' и F_2' распределены по площади поперечного сечения S равномерно. *Величина, характеризующая действие внутренних сил в деформированном твердом теле, называется механическим напряжением.*

Механическое напряжение характеризуется внутренней силой, действующей на единицу площади сечения деформированного тела:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (48.4)$$

Выведем единицу механического напряжения σ в СИ:

$$[\sigma] = [F/S] = 1 \text{ Н}/1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па}.$$

В СИ за единицу механического напряжения принимается *такое механическое напряжение в материале, при котором на площадь сечения 1 м^2 действует внутренняя сила 1 Н .*

Упругость, пластичность, хрупкость и твердость. *Свойство деформированных тел принимать свою первоначальную форму и свой объем после прекращения действия внешних сил называется упругостью. Деформация тела, которая исчезает после снятия внешних нагрузок на это тело, называется упругой деформацией.*

Опыт показывает, что тело можно деформировать настолько, что оно не восстановит свою прежнюю форму, когда внешние воздействия на него исчезнут. *Свойство тел сохранять деформацию после снятия внешних нагрузок называют пластичностью. Остаточная деформация тела, которая сохраняется после снятия внешних нагрузок на тело, называется пластической деформацией.*

Упругость (пластичность) тел в основном определяется материалом, из которого они сделаны. Например, сталь и резина упруги, а медь и воск пластичны. Деление материалов на *упругие* и *пластичные* условно, так как каждый материал в большинстве случаев обладает одновременно и пластичностью, и упругостью. Например, стальную пружину можно растянуть так, что она уже не сожмется. С другой стороны, медная спираль при небольших растяжениях пружинит (т. е. сжимается, если ее отпустить). Опыт показывает, что обычно при постепенном увеличении нагрузок на материал в теле сначала возникают упругие деформации, а затем появляются пластические деформации. Кроме того, свойства материала сильно зависят от внешних условий. Например, обычно пластичный свинец при низких температурах становится упругим, а упругая сталь при очень больших давлениях или высоких температурах становится пластичной.

Закон Гука. Модуль упругости. Связь между упругими деформациями и внутренними силами в материале впервые была установлена английским ученым Р. Гуком. *Закон Гука* формулируется так: *механическое напряжение в упруго деформированном теле прямо пропорционально относительной деформации этого тела:*

$$\sigma = k\varepsilon. \quad (48.5)$$

Закон Гука — это экспериментальный закон.

Величина k , характеризующая зависимость механического напряжения в материале от рода последнего и от внешних условий, называется *модулем упругости*. Модуль упругости измеряется механическим напряжением, которое должно возникнуть в материале при относительной упругой деформации, равной единице.

Единицей модуля упругости в СИ является **1 Па (паскаль)**.

Рассмотрим в качестве примера применение закона Гука к деформации одностороннего растяжения или сжатия. Формула (48.5) для этого случая принимает вид:

$$\sigma_{\parallel} = E\varepsilon, \text{ или } \sigma_{\parallel} = E \frac{\Delta l}{l}, \quad (48.6)$$

где E — модуль упругости для этого вида деформации; его называют *модуль Юнга*.

Модуль Юнга измеряется нормальным напряжением, которое должно возникнуть в материале при относительной деформации, равной единице, т. е. при увеличении длины образца вдвое ($\Delta l = l$). Числовое значение модуля Юнга рассчитывают экспериментально и заносят в таблицу.

Поскольку $\sigma_{\text{н}} = \frac{F}{S}$, из (48.6) получаем: $\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$, откуда $F = \frac{E \cdot S}{l} \Delta l$.

Величину $\frac{E \cdot S}{l} = k$ назвали коэффициентом упругости тела, или его жесткостью. По третьему закону Ньютона $F_{\text{упр}} = -F$, т. е.

$$F_{\text{у}} = -k\Delta l \quad (\text{закон Гука}). \quad (48.7)$$

Наибольшее напряжение в материале, после исчезновения которого форма и объем тела восстанавливаются, называется **пределом упругости**. Формулы (48.5) и (48.7) справедливы, когда не перейден предел упругости. При достижении предела упругости в теле возникают пластические деформации. В этом случае может наступить момент, когда при одной и той же нагрузке деформация начнет возрастать, и материал разрушается. *Нагрузку, при которой в материале возникает наибольшее возможное механическое напряжение, называют разрушающей.*

При постройке машин и сооружений всегда создают запас прочности. **Запасом прочности** называется величина, показывающая, во сколько раз фактическая максимальная нагрузка в самом напряженном месте конструкции меньше, чем разрушающая нагрузка.

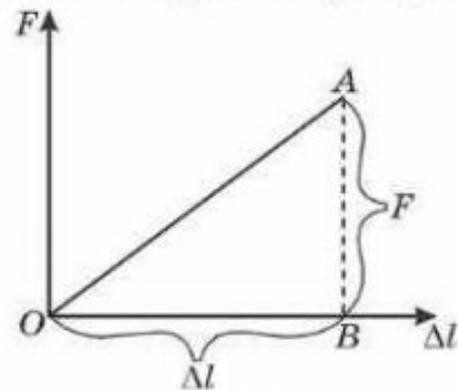


Рис. 48.6

Энергия упругодеформированного тела. Для того, чтобы упруго деформировать тело, нужно совершить работу. За счет этой работы деформированное тело приобретает потенциальную энергию $E_{\text{п}}$ и само может совершить работу A . В пределах упругой деформации можно считать, что $E_{\text{п}} = A$.

Из выражения (48.7) следует, что сила F , растягивающая или сжимающая стержень (рис. 48.6), пропорциональна абсолютной деформации Δl :

$$F = k\Delta l. \quad (48.8)$$

График этой зависимости показывает, что работа A , затраченная на растяжение или сжатие стержня на Δl , численно будет равна площади треугольника AOB (рис. 48.6), т. е.

$$A = \frac{F\Delta l}{2}, \quad W_{\text{п}} = \frac{F\Delta l}{2}. \quad (48.9)$$

Так как при упругой деформации $W_{\text{п}} = A$, то, подставив значение силы F из формулы (48.8), получим:

$$W_{\text{п}} = \frac{k(\Delta l)^2}{2}. \quad (48.10)$$

Таким образом, *потенциальная энергия упругодеформированного тела прямо пропорциональна квадрату абсолютной деформации.*

Примеры решения задач

1. Температура воздуха в комнате 20°C . Точка росы 12°C . Какова абсолютная и относительная влажность воздуха и какое количество водяного пара находится в комнате, объем которой 100 м^3 ?

Дано:

$$t_1 = 20^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 12^{\circ}\text{C}$$

$$V = 100\text{ м}^3$$

$$\rho - ? \quad m - ?$$

$$\phi - ?$$

Решение. Из таблицы находим, что при $t_2^0 = 12^{\circ}\text{C}$ абсолютная влажность $\rho = 10,7 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$. Для насыщения воздуха при 20°C необходимо количество водяного пара $\rho_{\text{н}} = 17,3 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$. Отсюда относительная влажность

$$\phi = \frac{\rho}{\rho_{\text{н}}} = \frac{10,7 \cdot 10^{-3}}{17,3 \cdot 10^{-3}} = 0,62; \quad \phi = 62\%.$$

Количество пара, находящегося в воздухе, $m = \rho V$.

Следовательно, $m = 10,7 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3 \cdot 100\text{ м}^3 = 1,07\text{ кг}$.

2. Точка росы 5°C . Сколько водяного пара может испариться в $1,0\text{ м}^3$ воздуха, температура которого 23°C ?

Дано:

$$t_1 = 5^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 23^{\circ}\text{C}$$

$$V = 1\text{ м}^3$$

$$\Delta m - ?$$

Решение. Для определения количества водяного пара, который может испариться в 1 м^3 воздуха, надо знать массу водяного пара m_1 , уже имеющегося в воздухе, и массу водяного пара m_2 , который мог бы насыщать этот воздух при температуре t_1 :

$$\Delta m = m_2 - m_1 = (\rho_2 - \rho_1)V = \Delta\rho V.$$

Из таблицы зависимости плотности насыщенного пара от температуры находим, что при $t_1 = 5^{\circ}\text{C}$, $\rho_1 = 6,8 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$; при $t_2 = 23^{\circ}\text{C}$, $\rho_2 = 20,6 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$, тогда $\Delta\rho = 13,8 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$. Отсюда $\Delta m = 13,8\text{ г}$ — такое количество водяного пара может испариться в 1 м^3 воздуха при температуре 23°C .

3. При температуре 10°C относительная влажность 80%. Как изменится относительная влажность, если повысить температуру до 20°C?

Дано:

$$t_1 = 10^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 20^\circ\text{C}$$

$$\phi_1 = 0,8$$

$$\phi_2 = ?$$

Решение. Из формулы $\phi_1 = \frac{\rho}{\rho_n}$ находим, что $\rho = \phi_1 \cdot \rho_n$. По таблице зависимости плотности насыщенного пара от температуры устанавливаем: при $t_1 = 10^\circ\text{C}$, $\rho_n = 9,4 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, то

$$\rho = 9,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 = 7,52 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

При $t_2 = 20^\circ\text{C}$, $\rho_{n_2} = 17,3 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, поэтому $\phi_2 = \frac{\rho}{\rho_{n_2}}$;

$$\phi_2 = \frac{7,52 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{17,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 0,43; \quad \phi_2 = 43\%.$$

Относительная влажность уменьшится на $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = 37\%$.

4. Какую энергию необходимо затратить на образование поверхности мыльного пузыря радиусом $r = 6$ см при постоянной температуре?

Дано:

$$r = 6 \text{ см} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\sigma = 0,04 \text{ Н/м}$$

$$W = ?$$

Решение. Энергия, затрачиваемая на образование поверхности пузыря, $W = \sigma S$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения мыльной пленки; S — сумма площадей внутренней и внешней поверхности сферической пленки.

Так как пленка тонкая, то радиус внешней и внутренней поверхности одинаков, т. е. $S = 2 \cdot 4\pi r^2$ или $S = 8\pi r^2$. Таким образом, $W = 8\pi\sigma \cdot r^2$.

$$W = 8 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot 36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 3,6 \text{ мДж}.$$

Домашнее задание:

Посмотреть презентацию

Выписать определения

Рассмотреть примеры решения задач