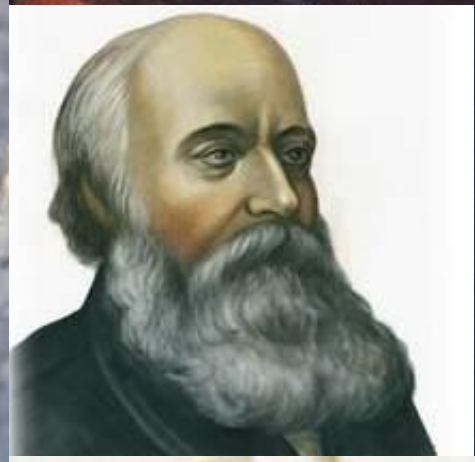
Взаимные превращения жидкости, пара и твёрдого тела

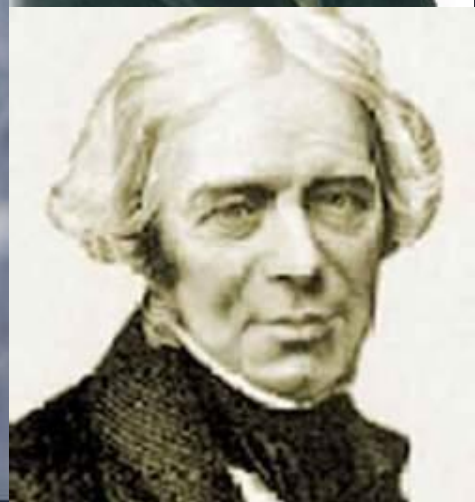
Теория:

- Агрегатные состояния вещества
- Плавление и кристаллизация (отвердевание)
- Испарение и конденсация. Кипение

Практика:

- Примеры решения задач
- Задачи для самостоятельного решения





Агрегатные состояния вещества

В обычных условиях любое вещество пребывает в одном из трех состояний – твердом, жидком или газообразном.

Чтобы вещество перешло из твердого состояния в жидкое (плавление или таяние), из жидкого в газообразное (кипение или испарение) или из твердого в газообразное (возгонка или сублимация), требуется поступление энергии извне. При обратных процессах (таких, как конденсация или кристаллизация) вещество, напротив, отдает энергию.

Меню

Изменение агрегатного состояния вещества. Плавление. Кристаллизация

- Плавление и отвердевание
- Аморфные вещества
- Переохлаждение
- Изменение объёма тела при плавлении и отвердевании
- Зависимость температуры плавления от давления
- Затвердевание растворов

Меню

Плавление и отвердевание

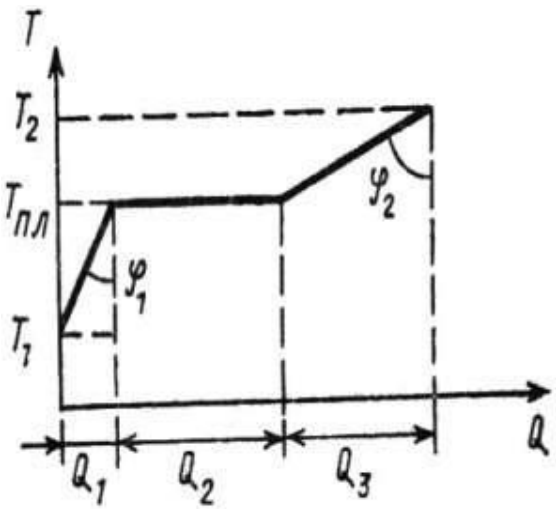
Переход вещества из твердого состояния в жидкое называется **плавлением**, обратный переход из жидкого состояния в твердое – **кристаллизацией**, или **отвердеванием**. Плавление всегда сопровождается поглощением энергии веществом, отвердевание же происходит при выделении телом теплоты. При плавлении за счет поглощаемого тепла кинетическая энергия молекул повышается и силы взаимодействия не могут удержать частицы вещества в узлах решетки. Упорядоченное движение молекул становится хаотическим, т.е. кристаллическая решетка разрушается.

При кристаллизации происходит сближение частиц, образующих решетку, и их потенциальная энергия уменьшается. При этом жидкость отдает свою энергию внешним телам. Таким образом, единица массы твердого вещества обладает меньшей внутренней энергией, чем единица массы того же вещества в жидком состоянии, даже если их температура одинакова.

Опыт показывает, что температура вещества не меняется, пока происходит плавление или отвердевание. Эта температура называется температурой плавления (отвердевания). Количество тепла, необходимое для плавления тела массы m, равняется:

$$Q=\lambda m,$$

где λ – удельная теплота плавления – это количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кристаллического вещества в жидкость при той же температуре. Для льда $\lambda = 3{,}4 \cdot 10^5$ *Дж/кг* .

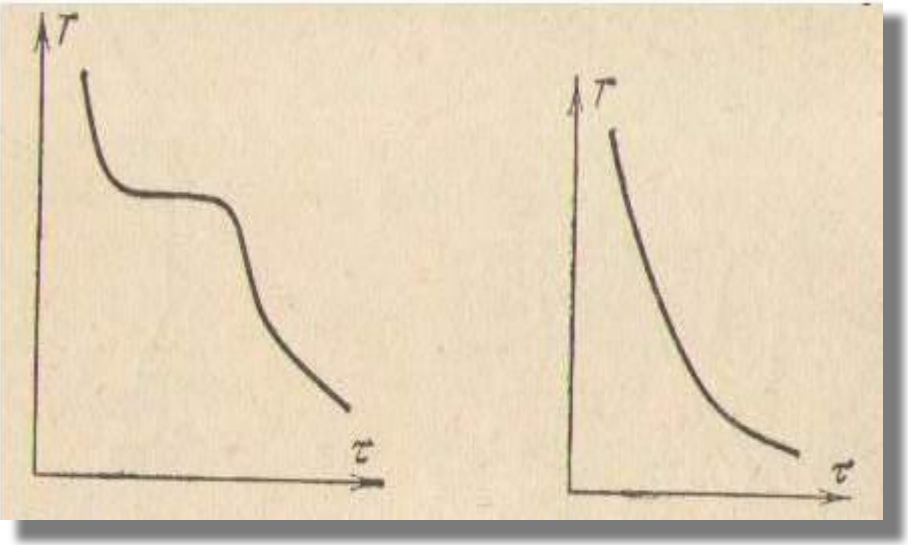


На рисунке представлен график зависимости температуры льда от полученной теплоты. Q_1 – теплота, полученная льдом при нагревании;
Q_2 – теплота, полученная льдом при плавлении;
Q_3 – теплота, полученная растаявшим льдом при нагревании;
тангенс углов наклона φ_1 и φ_2 пропорционален величинам теплоемкости льда и воды.

Меню

Аморфные вещества

Аморфные вещества (стекло, смола и т.д.) не имеют определенной точки плавления и отвердевания и при нагревании они постепенно размягчаются, оставаясь во время плавления однородными. При затвердевании аморфных тел не происходит переход вещества в новое состояние, происходит их постепенное превращение в достаточно «густую» жидкость.



Меню

Графики температуры отвердевающих кристаллического и аморфного тел

Переохлаждение

Если охлаждать жидкость, то она начинает затвердевать при температуре плавления. Иногда удается охладить жидкость ниже температуры плавления без того, чтобы она затвердела. Легко переохлаждается сахарный сироп, образуя леденец. По сути дела, любое аморфное вещество можно рассматривать как переохлажденную жидкость с очень большой вязкостью.

Для начала кристаллизации необходимы так называемые «центры кристаллизации». Центрами кристаллизации могут служить мелкие, иногда невидимые даже в микроскоп кристаллики (затравка) или посторонние пылинки. Если же центров кристаллизации нет, то может произойти переохлаждение на несколько кельвин даже жидкости с небольшой вязкостью. Важным примером этого является вода. Переохлаждение чистой, без каких-либо пылинок, воды часто наблюдается в природе. Капельки тумана могут не замерзать даже при морозах, достигающих -30°С. Переохлажденная жидкость находится в неустойчивом состоянии; с течением времени под влиянием тех или иных взаимодействий переохлажденная жидкость переходит в более устойчивое при данной температуре кристаллическое состояние.

Меню

Изменение объема тела при плавлении и отвердевании

При плавлении или отвердевании происходит изменение объема веществ, а значит, и плотности. Обычно расплавленная жидкость имеет больший объем, чем твердое тело. Но есть ряд веществ, у которых, наоборот, при плавлении объем уменьшается. К таким веществам относятся лед, чугун, висмут.

Меню

Зависимость температуры плавления от давления

Для веществ, объем которых увеличивается при плавлении, повышение давления затрудняет увеличение объема и тем самым повышает температуру плавления.

Затвердевание растворов

Температура затвердевания раствора ниже, чем чистого растворителя. При замерзании не очень крепкого раствора замерзает только растворитель. При некоторой определенной концентрации замерзает весь раствор целиком при более низкой температуре.

Меню

Испарение и конденсация. Кипение

- Изменение агрегатного состояния вещества.
- Испарение и конденсация.
- Кипение
- Критическая температура
- Сублимация
- Фазовая диаграмма
- Уравнение теплового баланса

Меню

Испарение и конденсация

Переход вещества из жидкого состояния в газообразное называется парообразованием. Одним из наиболее распространенных случаев парообразования является испарение. **Испарение** – это парообразование, которое происходит только со свободной поверхности жидкости, граничащей с газообразной средой. Молекулы жидкости могут двигаться с разными скоростями. Наиболее быстрые из них обладают достаточной энергией, чтобы покинуть жидкость, преодолев силы притяжения со стороны молекул, расположенных в поверхностном слое жидкости.

Очевидно, количество молекул, улетающих с единицы поверхности жидкости в единицу времени, тем больше, чем больше температура жидкости. Улетевшие молекулы уносят с собой энергию, поэтому при испарении происходит уменьшение температуры жидкости (охлаждение). Для поддержания неизменной температуры испаряющейся жидкости к ней необходимо подводить тепло. **Количество тепла, которое необходимо сообщить жидкости для ее испарения при постоянной температуре, называется теплотой парообразования:**

$$Q = rm,$$

где r – удельная теплота парообразования. Она показывает, какое количество тепла нужно затратить, чтобы обратить в пар 1 кг жидкости при неизменной температуре.

Часть подводимой теплоты расходуется на совершение работы против сил притяжения между молекулами при выходе из жидкости и сообщение молекулам кинетической энергии, другая тратится на работу против сил внешнего давления при увеличении объема образовавшегося пара. Величина r уменьшается с увеличением температуры, так как меньше приходится затрачивать энергии на совершение работы выхода. Например, для воды $r = 2{,}5 \cdot 10^6$ *Дж/кг при* $t = 0^\circ C$, *при* $t = 100^\circ C$ $r = 2{,}26 \cdot 10^6$ *Дж/кг* .

В результате хаотического движения над поверхностью жидкости молекулы пара снова могут попасть на эту поверхность и вернуться в жидкость. Этот процесс называется **конденсацией пара**.

Меню

Кипение

Кипение – это парообразование, которое происходит в объеме всей жидкости и при постоянной температуре. При кипении по всему объему жидкости образуются быстро растущие пузырьки пара, которые всплывают наверх. В пузырьке пар насыщенный. Пузырьки пара увеличиваются в объеме, когда давление насыщенного пара превышает внешнее атмосферное давление и гидростатическое давление столба жидкости высотой от ее поверхности до места, где находится пузырек.

С увеличением температуры окружающей жидкости давление насыщенного пара увеличивается, гидростатическое давление при подъеме пузырька уменьшается. Когда пузырек достигает поверхности жидкости, то давление насыщенного пара в нем практически равно атмосферному давлению на поверхности жидкости и пузырек лопается.

Кипение жидкости происходит при одинаковой температуре всей жидкости, когда давление насыщенного пара равно внешнему давлению. Чем больше внешнее давление, тем выше температура кипения. И наоборот, при уменьшении давления температура кипения понижается. Так, откачивая насосом воздух из сосуда, где находится стакан с водой, можно заставить воду кипеть при комнатной температуре.

Меню

Критическая температура и критическое давление

Великий русский ученый Д.И.Менделеев впервые выяснил в 1869г., что не при всякой температуре можно пар обратить в жидкость, и что для каждой жидкости существует температура , выше которой ее пары ни при каком давлении не могут быть обращены в жидкость.Такая температура называется критической. Например для воды она равна +374°С, для кислорода -188,82°С.

Кислород и другие газы при обычных температурах не могут быть обращены в жидкое состояние, какому бы давлению их не подвергали, потому, что их температура при этом значительно выше критической. Если поместить жидкость в замкнутый сосуд и нагревать ее, то упругость паров, полученных из этой жидкости, будет расти с ростом температуры. Одновременно будет расти и плотность паров, а плотность жидкости будет уменьшаться, пока различие между паром и жидкостью будет уменьшаться, пока различие между паром и жидкостью исчезнет. Давление, при котором исчезает различие между паром и жидкостью, находящихся при критической температуре, называется критическим. Например критическая температура углекислого газа + 31,1°С, а критическое давление 73 *ат*. Критическая температура аммиака + 132°С, а критическое давление 109 *ат*. Состояние, в котором находится вещество при критической температуре и критическом давлении, называется критическим. В критическом состоянии жидкость и ее пар становятся неразличимыми. Удельная теплота парообразования при критической температуре становится равной нулю.

Меню

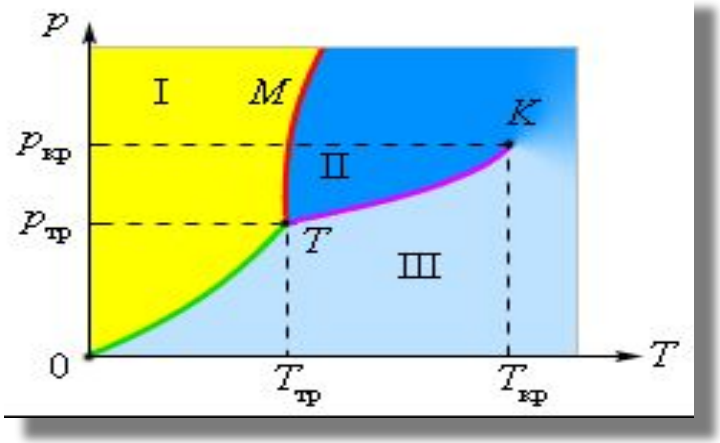
Сублимация

Есть и еще один тип фазового перехода — из твердого состояния вещества непосредственно в газообразное (минуя жидкость). Такое фазовое превращение называется *возгонкой*, или *сублимацией*. Самый бытовой пример: вывешенное сушиться на мороз сырое белье. Вода в нем сначала кристаллизуется в лед, а затем — под воздействием прямых солнечных лучей — микроскопические кристаллики льда попросту испаряются, минуя жидкую фазу. Другой пример: на рок-концертах «сухой лед» (замороженная двуокись углерода CO_2) используется для устройства дымовой завесы — она испаряется прямо в воздух, окутывая выступающих музыкантов и также минуя жидкую фазу. Соответственно, на преобразование твердого вещества непосредственно в газ затрачивается *энергия сублимации.*

Примером обратного процесса образования кристаллов из паров является образование инея и снежинок из водяных паров воздуха.

Меню

Фазовая диаграмма



Типичная фазовая диаграмма вещества.
К – критическая точка, Т – тройная точка.
Область I – твердое тело, область II – жидкость, область III – газообразное вещество.

Кривая *OT*, соответствующая равновесию между твердой и газообразной фазами, называется **кривой сублимации**. Кривая *TK* равновесия между жидкостью и паром называется **кривой испарения,** она обрывается в критической точке *K*. Кривая *TM* равновесия между твердым телом и жидкостью называется **кривой плавления.**

Кривые равновесия сходятся в точке *T*, в которой могут сосуществовать в равновесии все три фазы. Эта точка называется **тройной точкой**.

Меню

Уравнение теплового баланса

Многие расчеты процессов теплообмена, в которых происходит плавление (или отвердевание), проводят с помощью уравнения теплового баланса. Например, пусть в калориметре находилась вода $m_1 = 400$ *г* при $t_1 = 5^0C$. К ней долили еще воды $m_2 = 200$ *г* при $t_2 = 10^0C$ и положили 800 г льда при $t_3 = -50^0C$. Определим, какая температура установится в калориметре. Теплоемкостью калориметра можно пренебречь, удельная теплоемкость воды $C_в = 4200$ *Дж/кг*, льда $C_л = 2100$ *Дж/кг*, удельная теплота плавления льда $\lambda = 34\ 10^4$ *Дж/кг*. Количество тепла, которое необходимо для нагревания льда до 0^0C, равно: $Q_л = m_л C_л \Delta t = 84000$ *Дж*. Оно может быть получено за счет охлаждения двух порций воды до 0^0C. $Q_в = Q_1 + Q_2 = m_1 C_в \Delta t_1 + m_2 C_в \Delta t_2 = 16760$ *Дж*. Как видно, этого тепла, выделившегося при остывании всей воды, недостаточно, чтобы весь лед нагреть до 0^0C. Недостающее тепло для нагревания льда можно получить лишь при замерзании некоторого количества воды, т.е.

$$Q_л - Q_в = m_x \lambda, \text{ или } m_x = 200 \text{ г.}$$

Таким образом, в калориметре образуется смесь из $(m_1 + m_2 - m_x) = 400$ *г* воды и $(m_л + m_x) = 600$ *г* льда, находящегося при температуре 0^0C.

Меню

Примеры решения задач

1. В калориметре находится $m = 100$ *г* расплавленного металла галлия при температуре его плавления $t_{пл} = 29{,}8$ °*C*. Его начали медленно охлаждать, оберегая от внешних воздействий, и в результате температура понизилась до $t = 19{,}8$ °*C*, а галлий остался жидким. Когда переохлаждённый таким образом жидкий галлий размешали палочкой, он частично перешёл в твердое состояние. Найдите массу отвердевшего галлия и установившуюся в калориметре температуру. Удельная теплота плавления галлия $\lambda = 80$ *кДж/кг*, удельная теплоёмкость жидкого галлия $c = 410$ *Дж/(кг • °C)*. Теплоёмкостью калориметра и палочки пренебречь.

Решение. При отвердевании галлия выделяется теплота кристаллизации, что приводит к нагреванию системы до температуры плавления галлия $t_{пл} = 29{,}8$ °*C*, поскольку только при этой температуре жидкий и твёрдый галлий будут находиться в равновесии.

Количество теплоты, выделяющееся при отвердевании массы m_1 галлия, равно λm_1. Оно идёт на нагревание всего галлия до температуры плавления; для этого требуется количество теплоты $cm(t_{пл} - t)$. Следовательно,

$$m_1 = cm(t_{пл} - t) / \lambda \approx 5{,}1 \text{ г}.$$

Заметим, что если бы переохлаждение было очень сильным, то теплоты кристаллизации могло бы не хватить для нагревания всей массы галлия до температуры плавления. Однако, поскольку $m_1 < m$, то в нашем случае галлий действительно нагреется до этой температуры.

2. Под колоколом воздушного насоса находится вода массы $m = 40$ *г* при температуре $t_0 = 0$ °*C*. Воздух из-под колокола быстро откачивают. Благодаря интенсивному испарению воды оставшаяся часть ее замерзает. Найти массу $m_л$ образовавшегося льда, если его температура также $t_0 = 0$ °*C*. Удельная теплота плавления льда $\lambda = 0{,}33$ *МДж/кг*, удельная теплота парообразования воды $L = 2{,}3$ *МДж/кг*.

Решение. Испарившаяся вода имеет массу $m–m_л$. На ее испарение требуется количество теплоты $Q = (m–m_л)\,L$. При быстром откачивании теплота от окружающих тел не успевает передаться воде. Поэтому все это количество теплоты получается при образовании льда, т.е. $Q = m_л\,\lambda$.

Следовательно,

$(m–m_л)\,L = m_л\,\lambda$

и

$m_л = mL/(\lambda + L) = 35$ *г*.

Меню

3. В калориметре находился лёд массой $m_л = 0,5$ *кг* при температуре $t_л = -20$ °*C*. Удельная теплоёмкость льда $c_л = 2100$ *Дж/(кг • °C)*, а его удельная теплота плавления $\lambda = 340$ *кДж/кг*. В калориметр впустили пар массой $m_п = 60$ *г* при температуре $t_п = 100$ °*C*. Какая температура установится в калориметре? Удельная теплоёмкость воды $c_в = 4100$ *Дж/(кг • °C)*, удельная теплота парообразования воды $L = 2,2 \cdot 10^6$ *Дж/кг*. Теплоёмкостью калориметра и потерями тепла пренебречь.

Решение. Сначала нужно выяснить, что будет находиться в калориметре в конечном состоянии - только лёд, смесь льда и воды или только вода. Сравниваем количества теплоты, которые входят в уравнение теплового баланса, в первом случае. Теплота, выделяющаяся при конденсации всего пара, равна

$Q_1 = Lm_п = 132$ *кДж*.

Меню

Задачи для самостоятельного решения

1. Найти массу m воды, которая может быть превращена в лед испарением эфира, имеющего массу $m_э$ = 0,1 кг и температуру $t = 20$ °С. Начальная температура воды также $t = 20$ °С. Удельные теплоемкости воды и эфира $c = 4200$ Дж/(кг • °С) и $c_э = 2100$ Дж/(кг • °С). Удельная теплота плавления льда $\lambda = 0{,}33$ МДж/кг, удельная теплота парообразования эфира $L = 0{,}38$ МДж/кг.
2. В сосуде имеется некоторое количество воды и такое же количество льда в состоянии теплового равновесия. В сосуд впускают водяной пар при температуре 100 °С. Масса пара равна первоначальной массе воды. Удельная теплоемкость воды $c = 4200$ Дж/(кг • °С), удельная теплота плавления льда $\lambda = 0{,}33$ МДж/кг, удельная теплота парообразования воды $L = 2{,}3$ МДж/кг. Какая температура установится в сосуде. Сосуд считать теплоизолированным.
3. Вода может быть переохлаждена до температуры $t = -10$ °С. Такое состояние воды неустойчиво, и при любом возмущении вода превращается в лед с температурой $t_0 = 0$ °С. Какова масса $m_л$ льда, образовавшегося из переохлажденной воды, если масса ее $m = 1$ кг? Удельная теплоемкость воды $c = 4200$ Дж/(кг • °С), удельная теплота плавления льда $\lambda = 0{,}33$ МДж/кг.
4. В сосуд, содержавший $V = 1$ л воды при температуре $t_1 = 20$ °С, брошен комок мокрого снега массой $m_c = 250$ г. После достижения теплового равновесия температура воды в сосуде стала $t_2 = 5$ °С . Удельная теплоемкость воды $c = 4200$ Дж/(кг • °С), удельная теплота плавления льда $\lambda = 0{,}33$ МДж/кг. Теплоемкостью сосуда можно пренебречь. Определите массу $m_в$ воды, содержавшейся в комке мокрого снега.

Меню