



§ 8.

Плавление и кристаллизация

При теплообмене внутренняя энергия тела изменяется. Чаще всего это выражается в изменении его температуры. При этом агрегатное состояние вещества остается прежним. Однако существуют процессы, при которых внутренняя энергия вещества при получении теплоты увеличивается, а температура остается постоянной.

К таким процессам относятся *плавление* и *кристаллизация* (отвердевание). Изучим эти процессы с помощью опыта. В стакан поместим кусочки льда из морозильной камеры, охлажденные до температуры, например, -10°C . Вставим в стакан термометр и начнем нагревать (рис. 51). Температура льда повышается. Он нагревается. Внутренняя энергия льда увеличивается за счет кинетической энергии его молекул. Изменение температуры вещества в стакане с течением времени будем изображать на графике (рис. 52). Участок AB соответствует нагреванию льда от -10°C до 0°C . При дальнейшей передаче льду теплоты его температура остается постоянной, равной 0°C (участок BC). На что же уходит получаемая льдом теплота? Наблюдения показывают, что кристаллический лед превращается в воду.

Процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое называется плавлением.

Получаемая от плитки теплота по-прежнему превращается во внутреннюю энергию вещества, увеличивая ее. Это увеличение связано с изменением потенциальной энергии взаимодействия частиц при разрушении кристалла. Кинетическая же энергия не изменяется, так как температура постоянна. Аналогично идет процесс плавления других кристаллических веществ: железа, меди, стали и т. д.

Температура, при которой вещество переходит из твердого состояния в жидкое, т. е. плавится, называется температурой плавления.

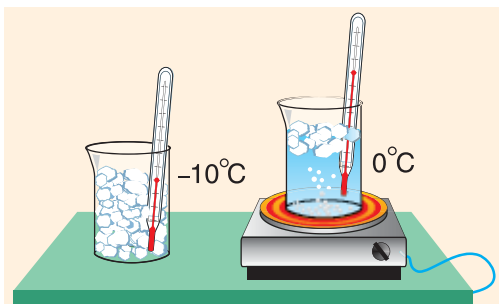


Рис. 51

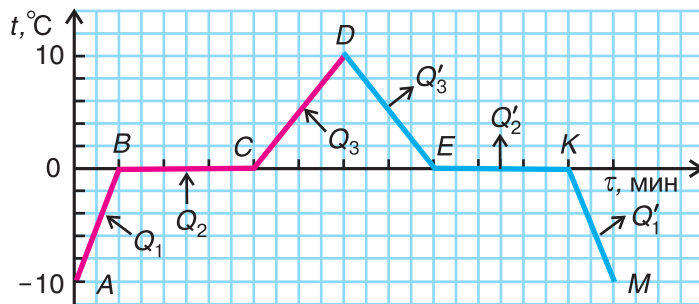


Рис. 52

Температура плавления у разных кристаллических веществ неодинакова (табл. 3). Она очень высокая у вольфрама и очень низкая у водорода.

Таблица 3. Температура плавления и удельная теплота плавления некоторых веществ (при нормальном атмосферном давлении)

Вещество	Температура плавления t , °C	Удельная теплота плавления λ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	Температура плавления t , °C	Удельная теплота плавления λ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Вольфрам	3387	$184\,000 = 1,84 \cdot 10^5$	Свинец	327	$24\,700 = 2,47 \cdot 10^4$
Платина	1772	$113\,000 = 1,13 \cdot 10^5$	Олово	232	$60\,300 = 6,03 \cdot 10^4$
Железо	1539	$270\,000 = 2,70 \cdot 10^5$	Лед	0	$333\,000 = 3,33 \cdot 10^5$
Сталь	1500	$84\,000 = 8,4 \cdot 10^4$	Ртуть	-39	$11\,800 = 1,18 \cdot 10^4$
Медь	1085	$210\,000 = 2,10 \cdot 10^5$	Спирт	-114	$11\,000 = 1,10 \cdot 10^4$
Золото	1064	$67\,000 = 6,70 \cdot 10^4$	Азот	-210	$25\,500 = 2,55 \cdot 10^4$
Серебро	962	$87\,000 = 8,70 \cdot 10^4$	Кислород	-219	$14\,000 = 1,40 \cdot 10^4$
Алюминий	660	$390\,000 = 3,90 \cdot 10^5$	Водород	-259	$58\,200 = 5,82 \cdot 10^4$

Продолжим опыт. Как только весь лед расплавится, температура воды в стакане начнет возрастать (участок CD , рис. 52). На всех рассмотренных участках теплота веществом (льдом, водой) поглощалась.

А теперь снимем стакан с плитки, поставим в морозильную камеру и будем периодически наблюдать за показаниями термометра и состоянием вещества. Будем считать, что график зависимости температуры от времени в случае охлаждения будет симметричным графику нагревания. Вода сначала охлаждается до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (участок DE). Ее внутренняя энергия уменьшается, теплота Q'_3 выделяется, причем $|Q'_3| = Q_3$. Затем идет процесс кристаллизации (участок EK), температура остается постоянной. Ее значение равно $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вода превращается в лед. Теплота Q'_2 выделяется, $|Q'_2| = Q_2$. Участок KM (рис. 52) соответствует охлаждению льда до температуры в камере.

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое называется кристаллизацией.

Обратите внимание, что *температура плавления и температура кристаллизации одинаковы*. Например, если олово плавится при температуре $232\text{ }^{\circ}\text{C}$ (табл. 3), то и отвердевать оно будет при температуре $232\text{ }^{\circ}\text{C}$.

▼ Для любознательных

В таблице 3 даны температуры плавления веществ при нормальном атмосферном давлении. И это неслучайно. Для большинства веществ с увеличением давления температура плавления увеличивается. Но для льда — наоборот: при повышении давления лед может плавиться, например, при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Понятия «температура плавления» и «температура кристаллизации» применимы не ко всем веществам. Согрев рукой кусок холодного твердого пластилина, мы ощутим постепенное уменьшение его твердости. Нагревая пластилин далее, можно перевести его в состояние вязкой жидкости. Но мы не обнаружим определенной температуры плавления. То же самое происходит при нагревании стекла: наблюдается непрерывное уменьшение его твердости (см. рис.) и увеличение текучести. Причина такого поведения указанных веществ (их называют аморфными) в отсутствии в их строении упорядоченного расположения частиц.



Понятия «температура плавления» и «температура кристаллизации» применимы лишь к веществам, имеющим кристаллическое строение.

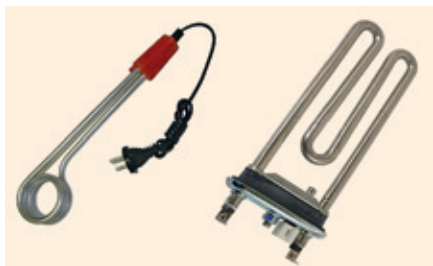


Рис. 53

Температуру плавления приходится учитывать при создании бытовой и промышленной техники. Спирали лампочек, нагревательных элементов (рис. 53) делают из тугоплавких материалов. В самолетостроении, в ракетной и космической промышленности используют материалы с высокой температурой плавления. Объясните причину этого.

Температуру плавления одних веществ можно изменить, смешивая их с другими. Так, добавляя поваренную соль ко льду, можно получить смесь с температурой плавления $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это свойство активно используют дорожные службы, посыпая зимой улицы смесью песка и соли.

■ Главные выводы

1. Для перехода кристаллического вещества из твердого состояния в жидкое его необходимо нагреть до температуры плавления.
2. В процессах плавления и кристаллизации температура вещества не изменяется.
3. Температуры плавления и кристаллизации для данного вещества одинаковы.
4. При плавлении вещество поглощает энергию, при кристаллизации столько же энергии выделяется.

? Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется плавлением? Кристаллизацией?
2. К каким веществам применимы термины «температура плавления» и «температура кристаллизации»?
3. Как объяснить постоянство температуры при плавлении вещества? На что расходуется подводимая при этом энергия?
4. Как изменяется внутренняя энергия при переходах «твердое вещество — жидкость» и «жидкость — твердое вещество»? Равны ли изменения внутренней энергии при этих переходах?
5. Можно ли железный гвоздь расплавить в оловянной чашке? Почему?
6. В каком состоянии при нормальном атмосферном давлении находятся свинец и азот, если их температуры равны соответственно $t_{\text{св}} = 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{азота}} = -215\text{ }^{\circ}\text{C}$? Почему?
7.  Кусок льда принесли с улицы, где температура была $t_1 = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, в сарай, температура в котором $t_2 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Будет ли таять лед? Почему?
8.  Замерзнет ли вода в какой-либо из пробирок, изображенных на рисунке 54? Почему?

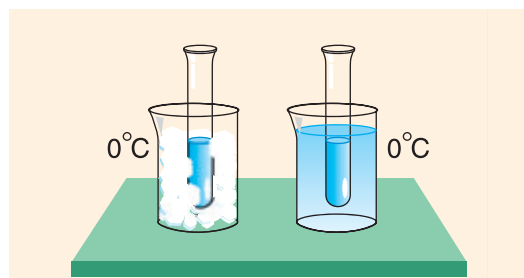


Рис. 54

➔ Домашнее задание

Зажгите свечу и наблюдайте переход воска из твердого состояния в жидкое. Объясните результаты наблюдения.



§ 9.

Удельная теплота плавления и кристаллизации

Как определить количество теплоты, которое должно поглотить твердое кристаллическое тело массой m , чтобы перейти в жидкое состояние, т. е. расплавиться? Еще раз обращаем ваше внимание на то, что температура во время плавления не изменяется (см. рис. 52 на с. 32, участок BC), но теплота телу сообщается. Значит, она идет на разрушение кристаллической упорядоченной структуры вещества тела.

Физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо передать твердому телу массой 1 кг при температуре плавления для перехода в жидкое состояние, называется удельной теплотой плавления.

Удельная теплота плавления обозначается греческой буквой λ (лямбда).

Чтобы расплавить твердое тело массой 2 кг, ему нужно передать энергии (теплоты) Q в 2 раза больше. А если масса тела равна m ? Очевидно, для перехода в жидкое состояние тело должно получить теплоты Q в m раз больше, т. е.

$$Q = \lambda m.$$

Из этой формулы следует, что удельная теплота плавления определяется как

$$\lambda = \frac{Q}{m}.$$

В СИ основной единицей удельной теплоты плавления является **1 джоуль на килограмм** $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$.

У различных веществ удельная теплота плавления λ неодинакова. В таблице 3 (см. с. 33) приведены ее значения для разных веществ. Как следует из таблицы, λ для ртути равна $11\,800 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$. Это значит, что для перехода ртути массой $m = 1$ кг, имеющей температуру $t = -39^\circ\text{C}$, из твердого состояния в жидкое ей нужно передать $Q = 11\,800$ Дж теплоты. Много теплоты для плавления массы $m = 1$ кг требуется льду — $\lambda = 333\,000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ (рис. 55, а). Но при замерзании при температуре $t = 0^\circ\text{C}$ столько же теплоты выделяет каждый килограмм воды (рис. 55, б).

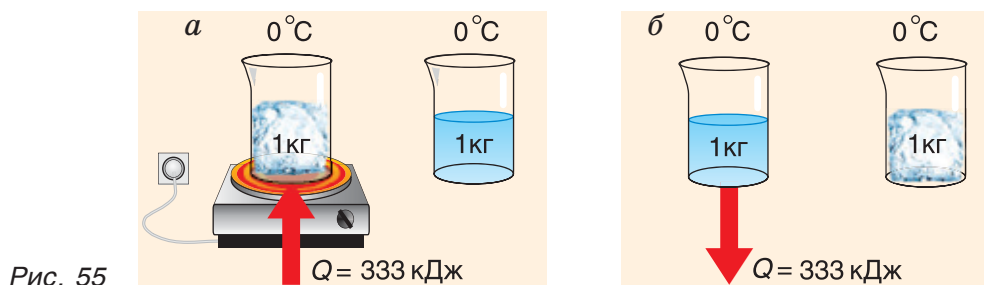


Рис. 55

Большая удельная теплота плавления объясняет затяжное таяние льда озер, рек и других водоемов. А так как теплоту лед поглощает из окружающей среды, то погода в это время, как правило, прохладная. И наоборот, при замерзании водоемов выделяется большое количество теплоты, что делает более теплой позднюю осеннюю погоду. Эта причина определяет умеренный климат в Республике Беларусь.



Рис. 56

Большая удельная теплота плавления льда и недостаточность солнечного тепла способствовали превращению Антарктиды в холодный ледовый континент. Но суровые погодные условия не являются препятствием для изучения Антарктиды. Начиная с 2006 г. ученые Национальной академии наук Беларуси (рис. 56) проводят на ледяном материке научные исследования по различным направлениям: мониторинг озонового слоя, биологические исследования и др.

■ Главные выводы

1. При переходе 1 кг вещества из твердого состояния в жидкое при температуре плавления поглощается количество теплоты, численно равное удельной теплоте плавления. Ровно столько же теплоты выделяется при переходе 1 кг вещества из жидкого состояния в твердое.
2. Удельная теплота плавления у разных веществ различная.

? Контрольные вопросы

1. От чего зависит количество теплоты, необходимое для перехода твердого тела в жидкое состояние?
2. Что называется удельной теплотой плавления? В чем она измеряется?
3. Что означает выражение: «Удельная теплота плавления олова $\lambda = 60\,300 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ »?
4. Верно ли утверждение: «Удельная теплота плавления прямо пропорциональна количеству теплоты и обратно пропорциональна массе тела»? Почему?



Пример решения задачи

В горячую воду температурой $t_1 = 90^\circ\text{C}$ опустили кубик льда массой $m_2 = 0,20$ кг, имеющий температуру $t_2 = -10^\circ\text{C}$. Окончательная температура воды стала $t = 20^\circ\text{C}$. Определите массу горячей воды. Потерями теплоты пренебречь.

Дано:

$$m_2 = 0,20 \text{ кг}$$

$$t_1 = 90^\circ\text{C}$$

$$t_2 = -10^\circ\text{C}$$

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

$$c_{\text{в}} = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$c_{\text{л}} = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\lambda = 3,33 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$m_1 = ?$$

Решение

Составим уравнение теплового баланса: $|Q_{\text{отд}}| = Q_{\text{получ}}$. Отдавала теплоту горячая вода, охлаждаясь от температуры t_1 до температуры t : $Q_{\text{отд}} = c_{\text{в}} m_1 (t_1 - t)$. Лед получал теплоту, за счет которой он нагрелся от t_2 до $t_{\text{пл}} = 0^\circ\text{C}$, превратился в воду, затем полученная вода нагрелась от температуры $t_{\text{пл}}$ до температуры t :

$$Q_{\text{получ}} = Q_{\text{нагрев. льда}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{нагрев. воды}};$$

$$Q_{\text{получ}} = c_{\text{л}} m_2 (t_{\text{пл}} - t_2) + \lambda m_2 + c_{\text{в}} m_2 (t - t_{\text{пл}}).$$

$$\text{Тогда } c_{\text{в}} m_1 (t_1 - t) = -c_{\text{л}} m_2 t_2 + \lambda m_2 + c_{\text{в}} m_2 t, \text{ откуда } m_1 = \frac{-c_{\text{л}} m_2 t_2 + \lambda m_2 + c_{\text{в}} m_2 t}{c_{\text{в}} (t_1 - t)} =$$

$$= \frac{-2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0,20 \text{ кг} \cdot (-10^\circ\text{C}) + 3,33 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,20 \text{ кг} + 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0,20 \text{ кг} \cdot 20^\circ\text{C}}{4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (90^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} = 0,30 \text{ кг}.$$

Ответ: $m_1 = 0,30$ кг.

Упражнение 7

1. Если тело нагрелось, то его внутренняя энергия увеличилась. Верно ли будет обратное утверждение: если внутренняя энергия тела увеличилась, то оно нагрелось? Приведите примеры, подтверждающие ответ.

2. На сколько увеличится при плавлении внутренняя энергия серебра массой $m = 2,00$ кг?

3. Какое количество теплоты нужно передать золоту объемом $V = 60 \text{ см}^3$, взятому при температуре плавления, чтобы полностью расплавить его?

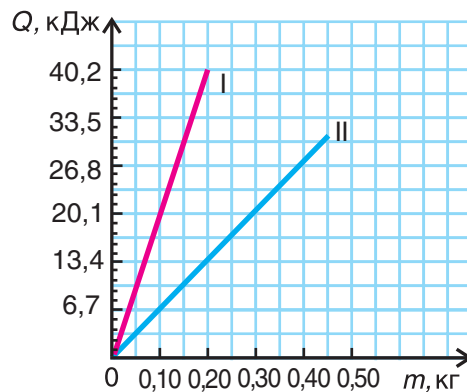


Рис. 57

4. Зависимость количества поглощенной теплоты от массы для двух веществ при их плавлении показана на рисунке 57. Определите удельную теплоту плавления обоих веществ. Что это за вещества? Сколько теплоты выделится при кристаллизации вещества II массой $m = 2,0$ кг?

5. Сколько теплоты потребуется, чтобы расплавить лед массой $m = 3,0$ кг, находящийся при температуре $t = -10$ °С? Постройте график зависимости количества поглощенной теплоты Q от температуры t льда.

6. До какой наименьшей температуры нужно нагреть железный куб, чтобы он, помещенный на лед при температуре $t_0 = 0,0$ °С, полностью в него погрузился? Считайте, что вся теплота, отданная кубом при охлаждении, идет на плавление льда.

7. В воду массой $m_1 = 20$ кг вливают олово при температуре плавления $t_{\text{пл}} = 232$ °С. В результате теплообмена установилась температура $t = 23$ °С. Найдите массу олова. Начальная температура воды $t_1 = 20$ °С.

8. В теплоизолированном сосуде находится вода массой $m_1 = 5,0$ кг при температуре $t_1 = 15$ °С. В воду опустили кусок льда при температуре $t_2 = -25$ °С. Определите массу льда, если в сосуде вся вода замерзла и установилась температура $t_0 = 0,0$ °С. Теплоемкостью сосуда пренебречь.

9. В алюминиевом калориметре массой $m_1 = 100$ г находится свинец массой $m_2 = 0,50$ кг при температуре $t_1 = 77$ °С. Определите массу мазута, который нужно сжечь, чтобы расплавить свинец.

10. Для плавления стали, имеющей начальную температуру $t_1 = 20$ °С, был сожжен каменный уголь марки А-I массой $m = 20$ кг. Какая масса стали расплавилась, если на плавление затрачено 50 % теплоты, полученной от сгорания угля?

 11. При температуре воздуха $t_1 = -10$ °С каждый квадратный метр поверхности пруда выделяет $Q = 180$ кДж теплоты в час. Какой толщины образуется лед за время $\tau = 2$ ч, если температура воды у поверхности пруда $t_2 = 0$ °С? Почему теплота выделяется?

 12. В алюминиевом сосуде массой $m_1 = 100$ г находится лед массой $m_2 = 500$ г при температуре $t_1 = -10$ °С. Какую массу мазута нужно сжечь, чтобы расплавить лед и нагреть воду до температуры $t_2 = 100$ °С, если окружающей среде передается 80 % энергии, выделяемой при его сгорании?

 13. Сосуд, содержащий смесь воды со льдом массой $m = 3,7$ кг, поставили на электрическую плиту и сразу же начали измерять температуру содержимого сосуда. График зависимости температуры от времени представлен на рисунке 58. Определите массу льда в смеси. Полезную мощность нагревателя электроплиты считать постоянной.

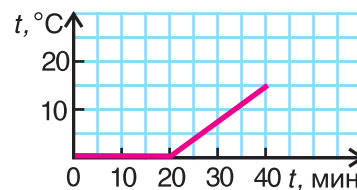


Рис. 58