

## Тема 10. Свойства паров, жидкостей и твердых тел

### 1. Испарение и конденсация

Как уже было отмечено ранее (см. Тема 8, п. 4), вещества могут переходить из одного агрегатного состояния в другое.

Рассмотрим отдельно переход вещества из жидкого состояния в газообразное и обратно.



Пар и газ - это одно и то же? Мы привыкли называть паром то, что образуется при испарении жидкости, поэтому: **пар - это газ**, который образуется при переходе вещества из жидкого состояния в газообразное.

**Испарение (парообразование)** - это переход вещества из жидкого состояния в газообразное. С точки зрения МКТ, испарение - это вылет с поверхности жидкости наиболее быстрых молекул => при испарении жидкости ее **U** уменьшается. Количество быстрых молекул в паре над жидкостью, наоборот, возрастает => его **U** увеличивается.

**Конденсация** - это переход вещества из парообразного (газообразного) состояния в жидкое. С точки зрения МКТ, конденсация - это возврат в жидкость наиболее медленных молекул пара => при конденсации пара его **U** уменьшается, а **U** жидкости, наоборот, увеличивается.

Известно, что скорость испарения жидкости зависит от некоторых факторов. Перечислим их:

- от *температуры* жидкости: чем больше ее температура, тем больше в ней быстрых молекул, которые могут легко вылетать с ее поверхности.
- от *площади* свободной поверхности жидкости: чем она больше, тем больше молекул могут покинуть жидкость в единицу времени;
- от *рода жидкости*: разные жидкости испаряются в разной скорости;
- от *наличия ветра* над поверхностью: ветер уносит вылетевшие с поверхности молекулы, освобождая место для других;
- от *давления* газа над поверхностью: в вакууме (пустоте) жидкость испаряется быстрее всего.

Важно не забывать, что испарение происходит *при любой температуре*, пока вещество находится в жидком состоянии.

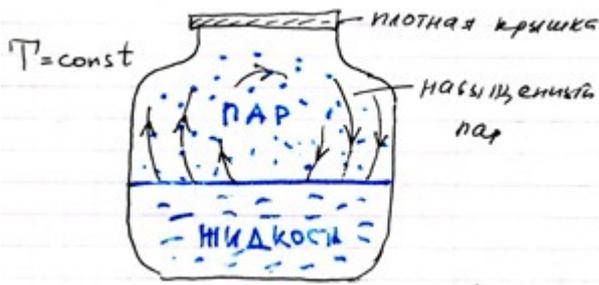
При *кипении* испарение происходит *наиболее интенсивно*.

Испарение происходит только *со свободной поверхности* жидкости.

**Свободная поверхность** - это та поверхность жидкости, которая соприкасается с газом (воздухом) или вакуумом.

### 2. Насыщенный пар. Влажность

Пусть в герметичном сосуде имеется жидкость, которая заполняет его наполовину. Будет ли происходить испарение? Обычно люди, не подумав, отвечают "НЕТ", мотивируя это тем, что уровень жидкости в сосуде не уменьшается. Конечно, это неверно. В предыдущем пункте *нигде* не сказано, что при испарении уровень жидкости *обязательно* должен уменьшаться. Испарение - это процесс, когда... Так вот, вылет наиболее быстрых молекул с поверхности жидкости в герметичном сосуде происходит? Конечно, **ДА** => испарение имеет место быть. Но уровень не уменьшается еще и потому, что *одновременно* с испарением происходит конденсация пара.



Если температура жидкости (и пара над ней) остается постоянной, и все прочие внешние условия не меняются, то устанавливается такое состояние, которое в физике называют **динамическим равновесием**. Оно характеризуется тем, что количество молекул, вылетающих с поверхности жидкости в единицу времени, равно количеству молекул, возвращающихся в жидкость в единицу времени. Концентрация частиц пара над жидкостью остается постоянной, температура - также постоянна => давление такого пара тоже постоянно.

Пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью, называют **насыщенным паром**.

При изменении внешней температуры происходит нарушение теплового равновесия => начинает преобладать какой-либо процесс: если **T** увеличится, то испарение; если **T** уменьшится, то конденсация, но до тех пор, пока снова не установится тепловое равновесие между жидкостью и внешней средой => снова внутри сосуда установится динамическое равновесие => снова установится постоянное давление насыщенного пара => давление насыщенного пара зависит от температуры.

**Кипение** - это процесс образования пузырьков насыщенного пара по всему объему жидкости => температура кипения зависит от внешнего давления. Вода, например, может не кипеть при 120C, а может закипеть при 50C. Естественно, парообразование - это процесс, для которого нужен приток энергии извне => жидкость постоянно надо подогревать, чтобы она кипела.

В воздухе всегда присутствует водяной пар. Мы говорим, что воздух бывает влажный, а бывает сухой => **абсолютная влажность** - это количество водяных паров в воздухе, которое измеряется в граммах на метр

кубический метр  $[\rho] - \text{г}/\text{м}^3$

Мы привыкли к тому, что влажность измеряется в %, когда об этом говорят в прогнозе погоды - это **относительная влажность** воздуха.

**Относительная влажность** - это физическая величина, равная отношению абсолютной влажности к плотности насыщенного пара в воздухе при данной температуре, выраженное в %:

$$\text{отн. влажн.} \quad r = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%$$

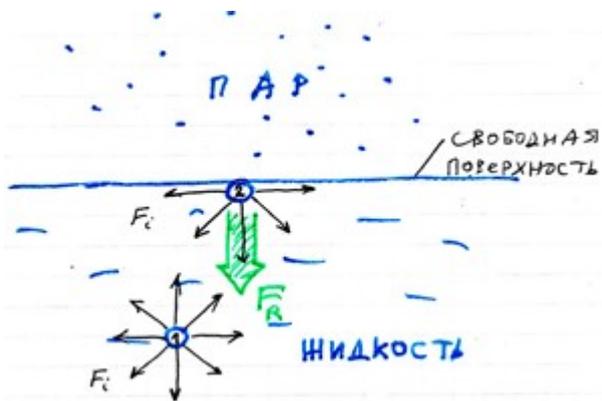
$\rho$  - абс. влажность       $\rho_0$  - плотность насыщ. пара

Для измерения влажности используют психрометры, гигрометры, а также различные цифровые приборы. Датчик влажности является обязательным элементом домашней метеостанции. *Нормальная* относительная влажность **r = 80%** (см. Тема 8, п.6).

Температура, при которой находящийся в воздухе пар становится насыщенным, называется *точкой росы*. При этом относительная влажность воздуха становится равной 100%.

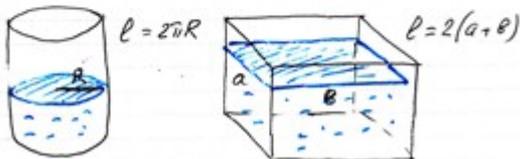
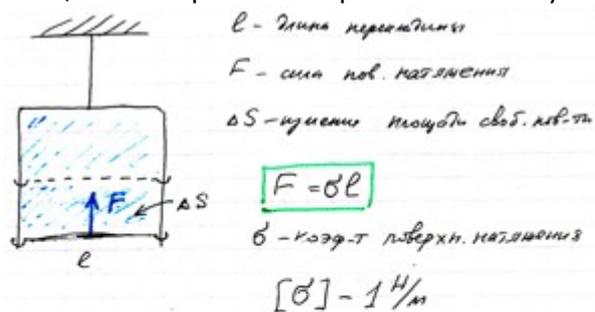
### 3. Сила поверхностного натяжения жидкости

В жидкости молекулы расположены довольно плотно и близко друг к другу, поэтому силы молекулярного взаимодействия играют очень важную роль в поведении жидкости.



Рассмотрим две молекулы жидкости. Одна из них **(1)** находится в глубинных слоях. На нее действуют силы со стороны соседних молекул  $F_i$ . Поскольку окружающих молекул очень много, то средняя сумма всех этих сил практически равна нулю  $\Rightarrow$  молекула находится в состоянии покоя. Однако, существует хаотичное колебательное движение этой молекулы и ее окружающих  $\Rightarrow$  равновесие иногда нарушается  $\Rightarrow$  молекула совершает непредсказуемый (хаотический) скачок в другое место, где снова некоторое время находится в состоянии равновесия. Время, в течение которого молекулы жидкости находятся в равновесии, называется *временем оседлой жизни*. Это время определяет такую важную характеристику жидкости как *вязкость*. Другая молекула **(2)** находится в поверхностном слое жидкости. Теперь уже действие на нее со стороны соседних молекул  $F_i$  не компенсируется, и возникает мощная результирующая сила  $F_r$ , которая стремится сместить молекулу "в глубь" жидкости. Довольное плотное расположение молекул не дает этой молекуле свободно сместиться, но даже если это и происходит, на место этой молекулы мгновенно встает другая, и все повторяется. Таким образом, в поверхностном слое жидкости существуют особые силы, которые стремятся (в итоге) уменьшить площадь свободной поверхности, поскольку, чем меньше площадь, тем меньше потенциальная энергия свободной поверхности (см. Тема 6, п. 5, в конце). Опытным путем установлено (можно доказать и математически), что жидкость, если на нее не действуют внешние силы (или их действие незначительно), то она принимает форму шара, потому что шар имеет наименьшую площадь поверхности (при равных объемах) по сравнению с другими геометрическими фигурами. Вспомните форму капелек росы на траве или капелек воды в невесомости.

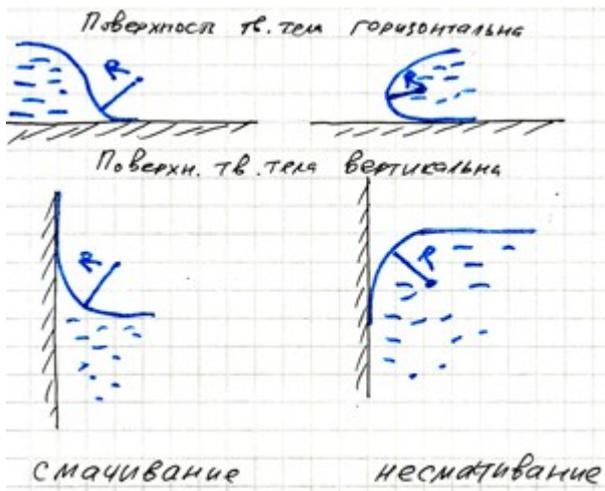
Если опустить проволочную рамку с подвижной перекладиной в мыльный раствор и вытащить ее оттуда - образуется мыльная пленка. Под действием силы поверхностного натяжения подвижная перекладина будет смещаться  $\Rightarrow$  работа совершается за счет уменьшения потенциальной энергии поверхностного слоя.



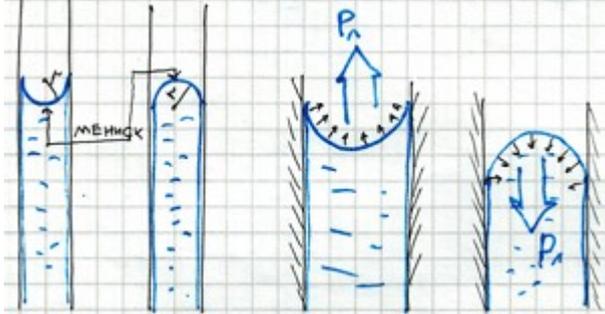
Сила поверхностного натяжения жидкости пропорциональна **длине** свободной поверхности. В качестве примеров приведены длины свободных поверхностей в цилиндрическом сосуде и в прямоугольном аквариуме.

#### 4. Капиллярные явления

При соприкосновении жидкости с поверхностью твердого тела обязательно происходит искривление свободной поверхности. Если центр кривизны находится внутри жидкости - она *не смачивает* поверхность твердого тела, а если вне жидкости - *смачивает*.



С этим явлением связано еще одно физическое явление - самопроизвольное поднятие или опускание жидкости в тонких трубках - капиллярах (диаметр менее 1 мм). Свободная поверхность в таких трубках искривляется - образуется полусферическая впадинка (смачивание) или выпуклость (несмачивание) - мениск. Сила поверхностного натяжения стремится уменьшить площадь мениска => возникает так называемое молекулярное давление, направленное к центру кривизны => жидкость начинает самопроизвольно перемещаться в капилляре. Молекулярное давление впервые рассчитал математик Лаплас, поэтому давление еще называют лапласовским:



$$P_1 = \frac{2\sigma}{r} \quad \text{где } r - \text{радиус капилляра}$$

давление столба жидкости  $P = \rho g h$

$\rho$  - плотность жидкости

$g$  - ускор. своб. падения

$h$  - высота

$$P = P_1, \text{ т.е. } \rho g h = \frac{2\sigma}{r} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$$

Лапласовскому давлению противостоит давление столба жидкости => жидкость будет двигаться по капилляру, пока эти два давления не уравновесят друг друга => можно рассчитать высоту, на которую

поднимется при смачивании, или опустится при несмачивании жидкость в капиллярной трубке.



## 5. Кристаллические и аморфные тела

В физике твердым телом считается тело, которое имеет *кристаллическое* строение. **Кристаллами** называют твердые тела, атомы или молекулы которых занимают упорядоченные положения в пространстве.

Твердые тела могут состоять из одного (монокристалла) кристалла - монокристаллы, или из громадного количества небольших кристаллов - поликристаллы.

К монокристаллам относятся, например, драгоценные и полудрагоценные камни. Основное свойство монокристалла - это зависимость физических свойств (теплопроводности, твердости, прозрачности, электропроводности) от направления в кристалле. Это называют *анизотропией* кристаллов.

К поликристаллам относятся металлы, каменная соль, сахар, лед. В поликристалле громадное количество мелких кристалликов ориентированы хаотично относительно друг друга, поэтому зависимости физических свойств от направления не наблюдается.

В зависимости от характера связей между атомами и/или молекулами различают:

- **молекулярную** связь, которая образуется при взаимодействии нейтральных молекул; кристаллы с молекулярной связью очень непрочны и имеют низкую температуру плавления, как, например, водяной лед;
- **ионную** связь, которую образуют + и - ионы, находящиеся в узлах кристаллической решетки; пример - обычная поваренная соль;
- **атомную** связь (ее называют также ковалентной), которая образуется посредством обмена внешними электронами между атомами в узлах кристаллической решетки; примеры - сурьма, селен, оксид кремния;
- **металлическую** связь, которая образуется всеми внешними электронами, свободно и хаотично движущимися между ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки. Эти "свободные" электроны называют *электронным газом*.

Твердые тела имеют строго определенную температуру плавления, которая не зависит от внешних факторов.

**Аморфные тела** занимают промежуточное положение между твердыми (кристаллическими) телами и жидкостями. В расположении атомов и/или молекул аморфных тел не наблюдается строгой упорядоченности, т.е. они не имеют кристаллической решетки. В то же время, атомы и/или молекулы имеют определенной время оседлой жизни, как жидкости, но по сравнению с жидкостями, это время у аморфных тел больше в десятки тысяч раз. При изменении температуры аморфные тела плавно переходят из одного агрегатного состояния в другое (твердое => жидкое => твердое) и не имеют строго определенной температуры плавления. При низких температурах аморфные тела проявляют в большей степени свойства твердых тел, а при повышении температуры на передний план выходят свойства, характерные для жидкостей.

Примеры аморфных тел: стекло, канифоль, смола, сахарный леденец.

## 6. Механические свойства твердых тел

Механические свойства твердых тел исследуют *методом деформаций* (см. Тема 4, п.4).

**Упругость** - это способность твердого тела восстанавливать первоначальную форму после прекращения внешнего воздействия.

**Твердость** - это способность твердого тела противостоять внешнему воздействию без разрушения.

**Пластичность** - это способность твердого тела сохранять деформацию после прекращения внешнего воздействия.

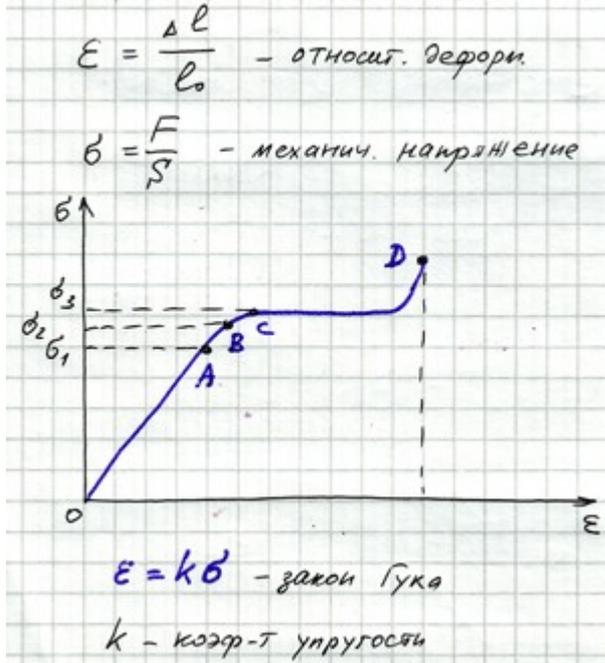
Большинство деталей машин и механизмов изготавливают из упругих сортов металлов и сплавов.

**Относительная деформация** показывает, какую часть от первоначального размера составляет абсолютная деформация.

**Механическое напряжение** равно отношению силы, действующей на тело, к площади поперечного

сечения.

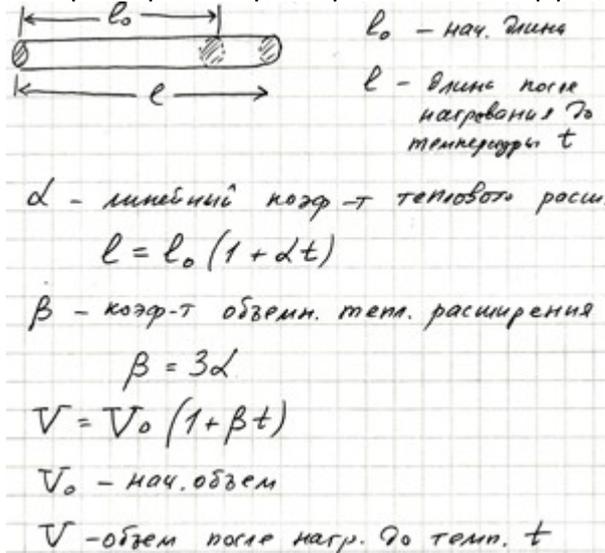
Если испытывать образец на растяжения, то можно выявить следующую зависимость **механического напряжения от относительной деформации**:



На участке **OA** механическое напряжение пропорционально относительной деформации - здесь выполняется **закон Гука**. Точка **A** - предел пропорциональности. Далее - на **AB** - пропорциональность нарушается, но деформация еще остается упругой. Точка **B** - предел упругости; упругая деформация сменяется пластической и относительное удлинение быстро нарастает. Начиная с точки **C** график становится параллельным оси абсцисс - это область текучести материала образца. Относительная деформация увеличивается при постоянном напряжении, после чего наступает разрыв образца - точка **D**.

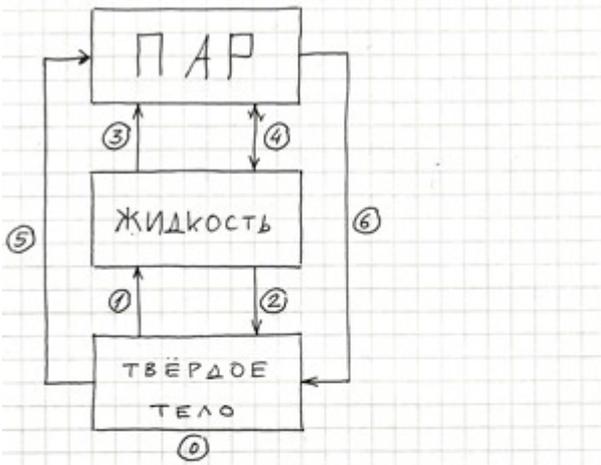
Механические свойства твердых тел очень сильно зависят от температуры. Например, сталь при высокой температуре становится пластичной, а при низкой температуре - хрупкой.

При нагревании возрастает интенсивность хаотических колебаний атомов металлов в узлах кристаллической решетки => возрастает размах колебаний => атомы как бы сближаются друг с другом => сильнее проявляют себя силы отталкивания  $F_{от}$  => увеличиваются расстояния между атомами => твердое тело расширяется при нагревании. Этот эффект называют тепловым расширением.



В результате деформации из-за теплового расширения поезд сошел с рельсов.

## 7. Общая схема фазовых переходов



0:  $Q_1 = c m \Delta t$   $c$  - удельная теплоемкость тв. тела  
 $m$  - масса  
 $\Delta t = t_2 - t_1$  - разность температур

1  $Q_2 = \lambda m$   $\lambda$  - удельная теплота плавления

3  $Q_3 = r m$   $r$  - удельн. тем. парообразования (испарения)

$\lambda$  - уд. тем. плавления и кристаллизации

$r$  - уд. тем. испарения и конденсации

Начнем рассмотрение схемы снизу вверх. Итак, твердое тело сначала необходимо нагреть **(0)**, сообщив ему некоторое количество теплоты **Q1**. Нагревание, т.е. увеличение температуры, происходит до тех пор, пока температура не достигнет точки плавления -  $T_{пл}$ . Далее начинается плавление твердого тела при постоянной температуре **(1)** и при постоянном притоке тепла **Q2**. Температура остается постоянной потому, что все тепло расходуется только на разрушение кристаллической решетки твердого тела. После того, как твердое тело расплавилось - перешло в жидкую фазу, температура снова начинает повышаться. Количество теплоты вычисляется по формуле **(0)**, с той разницей, что теперь  $c$  - удельная теплоемкость жидкости. Рост температуры продолжается до тех пор, пока не начнется процесс кипения, который также происходит при постоянной температуре  $T_k$ . Все тепло **Q3** на образование пара. Жидкость испарилась и перешла в газообразную фазу. При переходах **(0) => (1) => (3)** внутренняя энергия в каждой следующей фазе возрастает, т.к. температура растет (постоянный приток тепла!).

Если пар охлаждать, то при достижении температуры, равной точке росы, начнется его конденсация **(4)**, и температура будет оставаться постоянной и равной  $T_k$ . Количество теплоты, выделяемое при этом, вычисляется по формуле **(3)**. Затем жидкость начинает остывать и происходит это до температуры  $T_{пл}$ . Количество теплоты, выделяемое остывающей жидкостью, вычисляется по формуле **(0)**. Далее начинается процесс кристаллизации **(2)** также при постоянной температуре  $T_{кр}$ . Количество теплоты, выделяемое при кристаллизации, вычисляется по формуле **(2)**. Температура остается постоянной, поскольку вся энергия расходуется на создание кристаллической решетки твердого тела.

Таким образом, процессы плавления-кристаллизации, испарения-конденсации с энергетической точки зрения полностью идентичны.

Однако, возможен прямой переход вещества из твердой фазы в газообразную **(5)** и наоборот **(6)**.

Переход вещества из твердой фазы в газообразную называется **сублимацией** (возгонкой), а обратный переход - **десублимацией**.

Примеры сублимации: испарение кристалликов йода, испарение "сухого" льда, "исчезновение" инея, сушка белья на морозе.

Примеры десублимации: образование инея на деревьях и морозного узора на стеклах.

### Контрольные вопросы:

1. Что называется испарением или парообразованием?
2. Что называется конденсацией?
3. От каких факторов зависит скорость испарения жидкости?
4. Какую поверхность жидкости называют свободной?
5. Происходит ли испарение воды из открытого сосуда, если ее температура равна комнатной?
6. Происходит ли испарение воды в герметичном сосуде, заполненном жидкостью наполовину?
7. Опишите состояние динамического равновесия между паром и жидкостью.
8. Какой пар называют насыщенным?

9. Как связано динамическое равновесие с температурой?
10. Что называют кипением?
11. Как и почему температура кипения зависит от внешнего давления?
12. Какова разница между абсолютной и относительной влажностью?
13. Что такое "точка росы" и что означает относительная влажность 100%?
14. Какова особенность поведения молекул, находящихся в поверхностном слое жидкости?
15. Какую форму принимают капельки жидкости в свободном состоянии и почему?
16. От чего зависит сила поверхностного натяжения жидкости?
17. В чем разница между явлениями смачивания и несмачивания?
18. Почему и как жидкость начинает свободно перемещаться в капиллярах?
19. От чего зависит высота поднятия (опускания) жидкости в капилляре?
20. Какие тела в физике называют кристаллическими?
21. Назовите и коротко опишите типы связей в кристаллах.
22. Коротко охарактеризуйте аморфные тела.
23. Назовите основные механические свойства твердых тел.
24. Опишите график зависимости механического напряжения от относительной деформации.
25. Как и почему изменение температуры влияет на размеры твердых тел?
26. Опишите фазовый переход "твердое тело  $\rightleftharpoons$  жидкость".
27. Опишите фазовый переход "жидкость  $\rightleftharpoons$  пар".
28. Опишите фазовый переход "твердое тело  $\rightleftharpoons$  пар".