

Задание 9. Основы термодинамики и МКТ

Выбор правильных утверждений

Тип 1. Количество теплоты. Обработка табличных данных.

На что обратить внимание?

1. При изменении агрегатного состояния вещества (плавление и кристаллизация, переход жидкости в пар при кипении и конденсация) **температура не изменяется**. Процесс, происходящий с веществом, выбираете исходя из условия задания. Например, если вещество первоначально находилось в твердом состоянии, его температура увеличивалась, а затем перестает меняться, то значит наступил процесс плавления.
2. По изменению температуры можно сравнивать теплоемкость вещества в разных агрегатных состояниях. Если мощность подводимого тепла (или мощность отводимого тепла) постоянна, то за одинаковые промежутки времени, тело получает (или, соответственно, отдает) одинаковое количество теплоты. Чем больше удельная теплоемкость вещества, тем больше энергии ему нужно передать, чтобы изменить температуру на 1°C . В условиях, когда двум телам одинаковой массы (или телу постоянной массы, находящемуся в разных агрегатных состояниях) сообщают одинаковое количество теплоты, **удельная теплоемкость вещества будет тогда меньше, когда изменение температуры будет больше**.
3. По таблице бывает невозможно определить, в какой момент времени начинается процесс перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое. Поясним, о чем идет речь на конкретном примере ниже.
4. В процессе перехода вещества из одного состояния в другое, вещество находится частично в одном агрегатном состоянии, частично в другом. Но на границах этого процесса все по-другому. Например, в момент начала процесса плавления вещество находится только в твердом состоянии, а в момент окончания процесса – только в жидком.

Пример. Горячее вещество, первоначально находившееся в жидком состоянии, медленно охлаждали. Мощность теплоотвода постоянна. В таблице приведены результаты измерений температуры вещества с течением времени.

Время, мин.	0	5	10	15	20	25	30	35
Температура, $^{\circ}\text{C}$	250	242	234	232	232	232	230	216

Выберите из предложенного перечня все утверждения, которые соответствуют результатам проведённых измерений, и укажите их номера.

- 1) Температура плавления вещества в данных условиях равна 232°C .
- 2) Через 20 мин. после начала измерений вещество находилось только в твёрдом состоянии.
- 3) Удельная теплоёмкость вещества в жидком и твёрдом состояниях одинакова.

4) Через 30 мин. после начала измерений вещество находилось только в твёрдом состоянии.

5) Процесс кристаллизации вещества занял более 25 мин.

Анализ и решение. Что мы видим в таблице? Температура вещества, находящегося в жидком состоянии уменьшается (происходит охлаждение жидкости), перестает изменяться (происходит процесс кристаллизации), затем температура уменьшается (вновь происходит охлаждение, но теперь уже твердого вещества). Температура кристаллизации и температура плавления – это одна и та же температура (232°C). Обратите внимание: за первые пять минут охлаждения температура уменьшилась на 8°C , за следующие 5 минут тоже на 8°C , а вот в следующие 5 минут – на 2°C . При постоянной мощности отвода тепла изменение температуры за одинаковые промежутки времени также должно быть одинаковым. Это означает, что температура 232°C установилась раньше, чем через 15 минут после начала наблюдений, а значит и процесс кристаллизации начался раньше. То же самое можно, кстати сказать и относительно момента времени окончания процесса кристаллизации (подумайте почему?). Об этом мы и говорили в пункте 3 ранее. В интервале времени от 30 минут до 35 минут со стопроцентной гарантией происходит охлаждение твердого тела (температура снова начала понижаться). Причем, в указанный промежуток времени, изменение температуры составило 14°C , т.е. твердое вещество охлаждается быстрее, а значит теплоемкость вещества в твердом состоянии меньше, чем удельная теплоемкость вещества в жидком состоянии (утверждение 3 – неверно).

Из вышесказанного следует, что утверждения 1 и 4 являются верными, а остальные нет. Утверждение 2 – неверно, потому что процесс кристаллизации еще не закончился, поэтому вещество находится и в твердом и в жидком состоянии. Утверждение 5 – неверное, так как в указанный интервал времени входит и охлаждение жидкости.

Ответ: 14

Тип 2. Количество теплоты. Работа с графиками.

На что нужно обратить внимание?

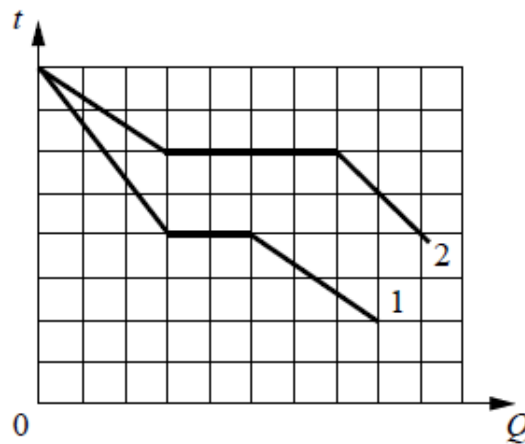
1. На участках графика, где **не изменяется температура**, происходит **переход вещества из одного агрегатного состояния в другое**. Процесс, происходящий с веществом, выбираете исходя из условия задания. Например, если вещество первоначально находилось в газообразном состоянии, его температура уменьшалась, а затем перестает меняться, то значит наступил процесс конденсации. Участки, где **температура растёт** – только **нагревание**! А где **уменьшается** – **охлаждение**!

2. Удельную теплоемкость вещества также можно сравнивать по изменению температуры (см. пункт 2 к предыдущему типу заданий) или по углу наклона графика. Если двум телам одинаковой массы (или телу постоянной массы, находящемуся в разных агрегатных состояниях) сообщают одинаковое количество теплоты, то **быстрее** будет **расти температура** у вещества с **меньшей удельной теплоемкостью**. Это будет соответствовать **графику с большим углом наклона** к горизонтальной оси.

3. По графику можно сравнивать удельную теплоту плавления и удельную теплоту парообразования веществ. Например, для двух тел одинаковой массы, большую удельную теплоту плавления будет иметь то тело, которое при плавлении поглощает больше энергии (или выделяет больше энергии при кристаллизации). А если еще есть возможность сравнить количественно, во сколько раз отличается количество теплоты (по единичным отрезкам на оси или по конкретным значениям), то тогда можно сказать и во сколько раз отличается удельная теплота плавления веществ. То же самое можно сказать относительно удельной теплоты парообразования (конденсации).

4. Тело получает энергию (его внутренняя энергия увеличивается) при нагревании, плавлении и кипении. Вещество отдает энергию (его внутренняя энергия уменьшается) при охлаждении, кристаллизации и конденсации. Почему-то ученики это упорно не хотят запоминать. Чтобы выйти из этой ситуации (вы забыли выделяется или поглощается энергия, увеличивается или уменьшается внутренняя энергия в процессе), спросите себя: нужно ли мне что-то делать, чтобы протекал процесс или он может протекать сам? Например, чтобы нагреть воду, нужно подогревать ее. А вот остывать она может уже без вашего участия. Тогда при нагревании вы передаете воде энергию (она поглощает тепло, ее внутренняя энергия увеличивается), а при охлаждении она сама отдает энергию (ее внутренняя энергия уменьшается). Также можно размышлять и относительно других процессов.

Пример. На рисунке представлены графики зависимости температуры t двух тел одинаковой массы от отданного ими при остывании количества теплоты Q . Первоначально тела находились в жидком агрегатном состоянии.



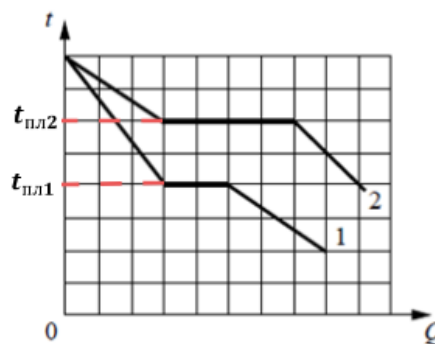
Используя данные графиков, выберите из предложенного перечня все верные утверждения.

- 1) Температура плавления второго тела в 1,5 раза выше, чем температура плавления первого тела.
- 2) Удельная теплота плавления второго тела в 2 раза меньше удельной теплоты плавления первого тела.
- 3) В жидком агрегатном состоянии удельная теплоёмкость второго тела в 1,5 раза больше, чем первого.
- 4) В твёрдом агрегатном состоянии удельная теплоёмкость второго тела больше, чем первого.

5) Удельная теплоёмкость первого тела в твёрдом агрегатном состоянии равна удельной теплоёмкости второго тела в жидком агрегатном состоянии.

Анализ и решение проведем не в общем, а по каждому утверждению (есть две стратегии при решении заданий №9: либо сначала описывают ситуацию в общем и затем выбирают правильные варианты, как мы поступили, рассматривая пример решения задания первого типа, либо берут каждое утверждение и проверяю его истинность; какую стратегию выбрать – решать вам).

1) Вещества первоначально находились в жидком состоянии (задано в условии) и начинают охлаждаться (видно по графику и сказано в условии). В тот момент времени, когда температура веществ перестает изменяться, они начинают кристаллизироваться. Видно, что температура кристаллизации (она же температура плавления) первого тела 4 единичных отрезка на оси температур, а температура кристаллизации второго – 6 единиц.

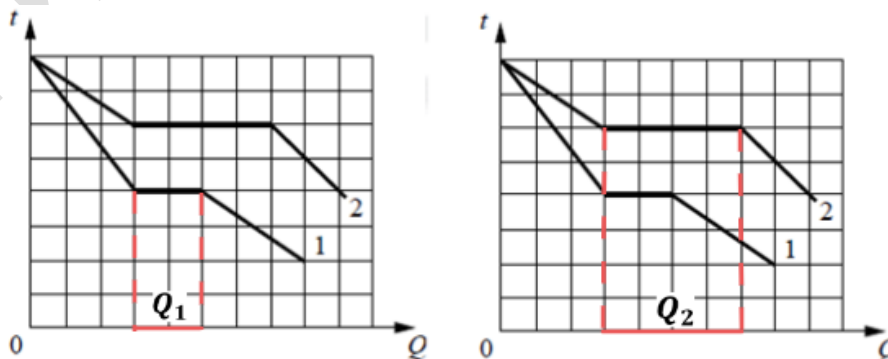


Таким образом,

$$\frac{t_{\text{крист}2}}{t_{\text{крист}1}} = \frac{t_{\text{пл}2}}{t_{\text{пл}1}} = \frac{6}{4} = 1,5.$$

Утверждение 1 – верно.

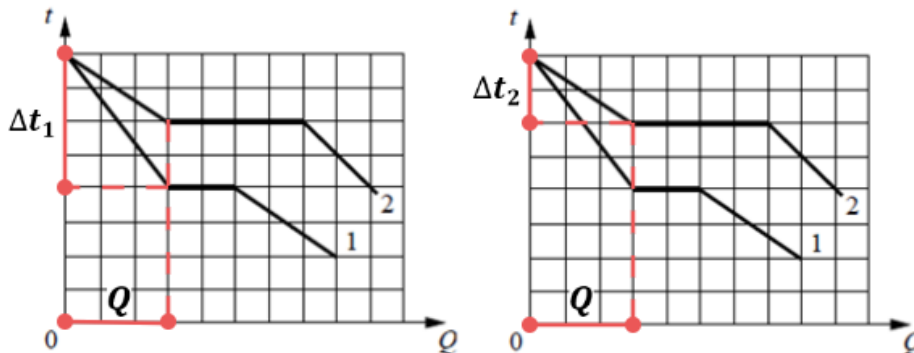
2) По графику видно, что второе тело при кристаллизации отдает в 2 раза большее количество теплоты Q_2 , чем отдает первое тело при кристаллизации Q_1 (4 единицы против 2-х). При плавлении второму телу также потребуется в 2 раза больше энергии. Значит, удельная теплота плавления второго тела в 2 раза **больше** удельной теплоты плавления первого тела. Это утверждение – неверно.



Аналитически (масса тел одинакова):

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{Q_2}{m} : \frac{Q_1}{m} = \frac{Q_2}{m} \cdot \frac{m}{Q_1} = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{4}{2} = 2.$$

3) При охлаждении обеих жидкостей до температуры кристаллизации выделяется одно и то же количество теплоты (3 единицы). Изменение температуры первой жидкости $\Delta t_1 = 4$ ед., а изменение температуры второй жидкости $\Delta t_2 = 2$ ед. Значит удельная теплоемкость первого вещества в жидком состоянии в 2 раза меньше удельной теплоемкости второго вещества в жидком состоянии. Утверждение 3 – неверно.

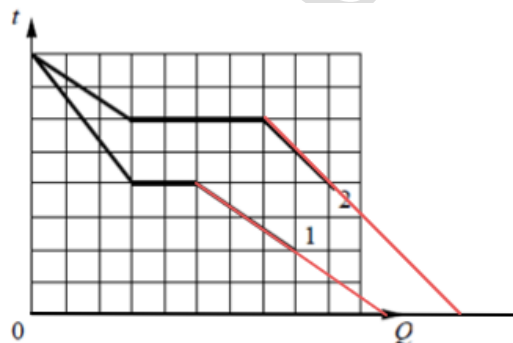


Аналитически:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow c_1 m \Delta t_1 = c_2 m \Delta t_2,$$

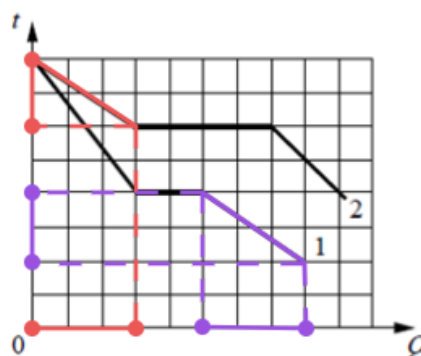
$$c_1 \Delta t_1 = c_2 \Delta t_2 \Rightarrow c_2 = 2c_1.$$

4) В твердом агрегатном состоянии удельная теплоемкость второго вещества напротив меньше, чем удельная теплоемкость первого вещества, так как оно охлаждается быстрее. Это можно выяснить по углу наклона графика относительно горизонтальной оси. Чтобы сравнить, мы продлим графики до горизонтальной оси.



Утверждение 4 – неверно.

5) Утверждение 5 – верное, так как при охлаждении первой жидкости выделяется такое же количество теплоты, как и при охлаждении второго тела в твердом состоянии и при этом изменение температуры также одинаково. Также можно заметить, что указанные участки графиков наклонены к горизонтальной оси под одним углом.



Тип 3. Полупроницаемая перегородка.

Суть задания сводится к тому, что в сосуд, разделённый на две равные по объёму части пористой неподвижной перегородкой помещают два газа при одинаковой температуре. Молекулы одного из газов могут проникать через перегородку, а молекулы другого – нет. Напомним, что газы, занимают весь предоставленный им объем, поэтому молекулы того газа, которые могут проникать через перегородку будут переходить в ту часть сосуда, где их не было. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока парциальное давление газа, который может проникать через перегородку, станет равным по обе стороны перегородки.

При решении задания полезно сделать схему, на которой показать распределение газов по количеству в правой и левой частях сосуда в самом начале и в момент установления равновесия (иногда задают не количество, а массу газа, тогда нужно найти количество газа по известной формуле, а молярную массу для этого можно взять в справочных сведениях).

Было	
ν_1 газа 1	ν_2 газа 2
Стало	
$\frac{\nu_1}{2}$ газа 1	ν_2 газа 2 + $\frac{\nu_1}{2}$ газа 1

Теперь некоторые утверждения, глядя на эту схему, будут для вас очевидными. При решении задания могут потребоваться формулы:

1. Количества вещества

$$\nu = \frac{m}{M}.$$

2. Концентрации молекул

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_A}{V}.$$

3. Закон Дальтона

$$p = p_{r1} + p_{r2}.$$

4. Уравнение Менделеева – Клапейрона

$$pV = \nu RT.$$

5. Внутренняя энергия

$$U = \frac{3}{2} \nu RT.$$

Пример. Сосуд разделён на две равные по объёму части пористой неподвижной перегородкой. В левой части сосуда содержится 4 моль гелия, в правой – 40 г аргона. Перегородка может пропускать молекулы гелия и является непроницаемой для молекул аргона. Температура газов одинаковая и остаётся постоянной.

Выберите все верные утверждения, описывающих состояние газов после установления равновесия в системе.

- 1) Концентрация гелия в правой части сосуда в 2 раза меньше, чем аргона.
- 2) Отношение давления газов в правой части к давлению газа в левой части равно 1,5.
- 3) В правой части сосуда общее число молекул газов меньше, чем в левой части.
- 4) Внутренняя энергия гелия и аргона одинакова.
- 5) В результате установления равновесия давление в правой части увеличилось в 3 раза.

Решение. Сначала найдем какое количество аргона содержится в правой части сосуда. Согласно справочным сведениям, молярная масса аргона $\mu = 40 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, поэтому

$$\mu = \frac{40 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{40 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} = 1 \text{ моль.}$$

Покажем на схеме состояние газов в момент начала наблюдения и при установлении равновесия в системе.

4 моль гелия	1 моль аргона
--------------	---------------

2 моль гелия	1 моль аргона + 2 моль гелия
--------------	------------------------------------

Теперь выбираем утверждения:

1. Количество гелия в правой части сосуда в два раза больше, чем количество аргона при одинаковом занимаемом ими объеме, значит концентрация гелия в правой части сосуда в 2 раза **больше**, чем аргона. Утверждение – неверно. Покажем и аналитически

$$\frac{n_r}{n_a} = \frac{v_r N_A}{V} : \frac{v_a N_A}{V} = \frac{v_r N_A}{V} \cdot \frac{V}{v_a N_A} = \frac{v_r}{v_a} = \frac{2}{1} = 2.$$

2. Количество гелия в левой части сосуда в 1,5 раза меньше, чем общее количество гелия и аргона в правой части. При одинаковых занимаемых объемах и температурах это будет означать, что давление в правой части сосуда будет в 1,5 раза больше, чем в левой. Утверждение 2 – верно. Покажем и аналитически. Давление в правой части сосуда находится по закону Дальтона, а давление каждого газа выразим через уравнение Менделеева-Клапейрона

$$\frac{p_{\text{пр}}}{p_{\text{лев}}} = \frac{p_a + p_{r1}}{p_{r2}} = \frac{\frac{\nu_a RT}{V} + \frac{\nu_{r1} RT}{V}}{\frac{\nu_{r2} RT}{V}} = \frac{\nu_a + \nu_{r1}}{\nu_{r2}} = \frac{1 + 2}{2} = 1,5.$$

3. В правой части сосуда общее число молекул газов **больше**, чем в левой части: там содержится столько же гелия, как и в левой части (одинаковое число молекул гелия справа и слева) + молекулы аргона. Утверждение 3 – неверно.

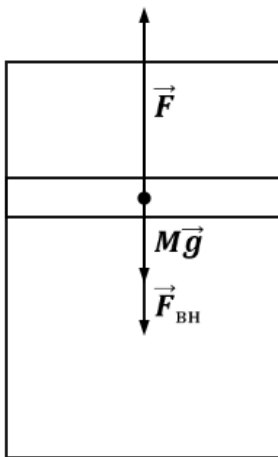
4. Из формулы внутренней энергии следует (формула 5 выше), что внутренняя энергия гелия больше, т.к. при одинаковой температуре его содержится в сосуде в 4 раза больше по количеству. Утверждение 4 – неверно.

5. Количество вещества в правой части сосуда без изменения объема и температуры возросло в 3 раза (было 1 моль аргона; стало 3 моль гелия и аргона вместе), поэтому и давление в правой части сосуда увеличилось в 3 раза. Покажем аналитически

$$\frac{p_{\text{лев. после}}}{p_{\text{лев. до}}} = \frac{p_a + p_r}{p_a} = \frac{\frac{\nu_a RT}{V} + \frac{\nu_r RT}{V}}{\frac{\nu_a RT}{V}} = \frac{\nu_a + \nu_r}{\nu_a} = \frac{1 + 2}{1} = 3.$$

Тип 4. Изобарный процесс: особенности протекания + первый закон термодинамики.

Как узнать, что процесс, происходящий с газом изобарный? Как правило, используется типовая модель: газ находится в цилиндре под поршнем, который может скользить в цилиндре без трения (стенки цилиндра гладкие) при неизменном внешнем давлении.



На поршень в равновесии действует три силы: сила тяжести $M\vec{g}$, сила внешнего давления (чаще всего атмосферного) $\vec{F}_{\text{вн}}$ и сила давления газа $\vec{F}$. Допустим мы подводим к газу некоторое количество теплоты, нагревая его. При этом газ расширяется, а поршень занимает новое положение равновесия. Согласно второму закону Ньютона для обоих состояний поршня выполняется равенство

$$\vec{F} + M\vec{g} + \vec{F}_{\text{вн}} = 0$$

или

$$F - Mg - F_{\text{вн}} = 0 \Rightarrow F = Mg + F_{\text{вн}}.$$

Как мы видим, если поршень находится в равновесии, то сила давления газа одинакова, независимо от того какое положение займет поршень и по модулю равна сумме модулей силы тяжести и силы внешнего давления. Сила давления газа $F = pS$, где p – давление газа, S – площадь поршня. Сила внешнего давления $F_{\text{вн}} = p_{\text{вн}}S$, где $p_{\text{вн}}$ – внешнее давление газа (чаще всего $p_{\text{вн}} = p_{\text{атм}}$), S – также площадь поршня. Перепишем последнее равенство

$$pS = Mg + p_{\text{вн}}S \Rightarrow p = \frac{Mg}{S} + p_{\text{вн}}.$$

Давление газа тоже будет одинаковым при любом положении поршня в положение равновесия. А если нагревание происходит медленно, так что поршень поднимается равномерно, то можно считать, что в течении всего времени, пока происходило нагревание, давление газа было неизменным, т.е. с газом происходил изобарный процесс.

Если **поршень невесомый**, то считаем $M = 0$ кг и тогда **давление газа** будет **равно внешнему** давлению $p = p_{\text{вн}}$.

Если газу сообщить некоторое количество теплоты, то его внутренняя энергия будет увеличиваться и газ, расширяясь, будет совершать работу ($A > 0$), а работа внешней силы – отрицательна.

Если же газ отдает некоторое количество теплоты, то его внутренняя энергия будет уменьшаться, внешняя сила, сжимая газ, будет совершать работу ($A_{\text{вн}} > 0$), теперь напротив работа газа – отрицательна.

Пример. В вертикальном цилиндре под поршнем находится 2 моль гелия. Поршень может перемещаться в цилиндре без трения. Атмосферное давление считать постоянным. Масса гелия в цилиндре постоянна. Из приведённого ниже списка выберите все верные утверждения, характеризующие изменение состояния гелия.

- 1) При медленном повышении температуры объём, занимаемый гелием, увеличивается.
- 2) При медленном повышении температуры давление гелия в сосуде увеличивается.
- 3) Если на поршень насыпать некоторое количество песка, не меняя температуры гелия, то давление гелия после того, как система придёт в равновесие, будет равно первоначальному давлению.
- 4) При медленном понижении температуры сила давления гелия на поршень не изменяется.
- 5) При сжатии гелия в цилиндре внешние силы совершают отрицательную работу.

Решение. Внешнее давление – атмосферное. Ситуация, описанная в задании, подходит под модель изобарного процесса.

1. В изобарном процессе, при увеличении температуры газа, его объём также увеличивается

$$\frac{V}{T} = \text{const}; T \uparrow \Rightarrow V \uparrow.$$

Это утверждение верное.

2. Утверждение неверное – процесс изобарный.

3. Если насыпать на поршень песок, то придется учитывать силу тяжести, действующую на песок. Условие равновесия поршня примет вид

$$F = M_{\text{песка}}g + M_{\text{поршня}}g + F_{\text{вн}}.$$

Сила давления газа увеличится, а значит и увеличится давление газа под поршнем. Утверждение 3 – неверно.

4. Как уже было показано выше, при изменении температуры (мы рассматривали ситуацию, когда температура газа растёт, но если она будет понижаться, то принципиально ничего не поменяется) сила давления газа не меняется. Это утверждение верное.

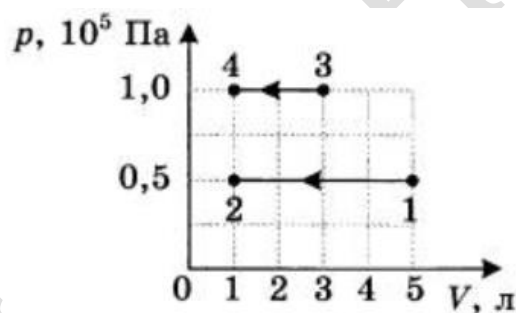
5. При сжатии газа, направление действия силы совпадает с направлением перемещения поршня, поэтому эта сила совершает положительную работу. Утверждение – неверно.

Ответ: 14.

Мы забыли сделать важную оговорку, все, о чем мы говорили должно происходить с постоянной массой газа, чтобы мы могли считать процесс изобарным.

Сюда же мы отнесем задания, в которых изобарный процесс задан в виде графика в координатах pV . При решении требуется провести анализ изменения величин в изобарном процессе. Для этого подойдут формулы, которые мы указывали раньше, при решении заданий **тип 3**. А также пригодится знание того факта, что работу газа можно найти как площадь под графиком в координатах pV .

Пример. На pV -диаграмме показаны два процесса, проведённых с одним и тем же постоянным количеством газообразного гелия. Из приведённого ниже списка выберите все верные утверждения, характеризующие процессы на графике.



- 1) В процессе 1–2 гелий изобарно уменьшил свой объём на 5 л.
- 2) В процессе 3–4 абсолютная температура гелия изобарно увеличилась в 3 раза.
- 3) Работа, совершённая внешними силами над гелием, в процессе 1–2 меньше, чем в процессе 3–4.
- 4) В процессе 1–2 внутренняя энергия гелия уменьшилась в 5 раз.
- 5) В процессе 1–2 давление гелия в 2 раза меньше, чем в процессе 3–4.

Решение. Как видно из графиков, оба процесса – изобарные.

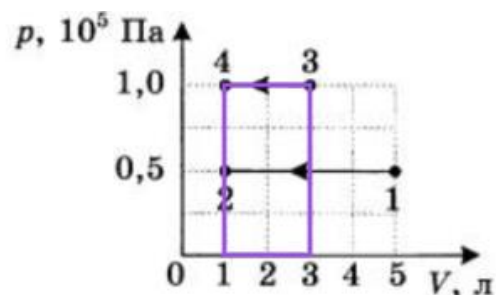
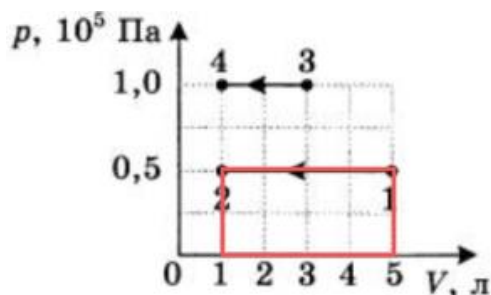
1. Утверждение неверно. Объём газа в состоянии 1 составляет 5 литров, а после перехода с состояние 2 – 1 литр. Изменение объёма $\Delta V_{12} = 1 \text{ л} - 5 \text{ л} = -4 \text{ л}$ (уменьшился на 4 литра).

2. В изобарном процессе, объём уменьшается (а на графике он уменьшается) при уменьшении температуры

$$\frac{V}{T} = \text{const}; V \uparrow \Rightarrow T \uparrow.$$

Это утверждение неверное.

3. Работа внешней силы и работа газа по величине (по модулю) равны. Поэтому для сравнения работ внешней силы, совершенной при сжатии газа, в процессах 1-2 и 3-4 можно сравнить работу газа в этих процессах. Самое простое – сравнить площади под графиками.



Фигуры под графиками имеют одинаковую площадь, значит работа газа и работа внешних сил одинакова в процессах. Утверждение 3 – неверно.

4. Внутренняя энергия одноатомного идеального газа

$$U = \frac{3}{2} \nu RT = \frac{3}{2} pV.$$

В процессе 1-2 объем гелия уменьшается в 5 раз (5 л → 1 л), поэтому и внутренняя энергия гелия уменьшается в 5 раз. Это утверждение верное.

5. Давление газа в процессе 1-2, судя по графику, $p_{12} = 0,5 \cdot 10^5$ Па, а в процессе 3-4 $p_{34} = 1 \cdot 10^5$ Па, т.е. в два раза больше. Это утверждение также верное.

Ответ: 45.

Тип 5. Влажность воздуха.

Центральное понятие здесь – насыщенный пар. Традиционно вопросы, связанные с влажностью и паром, вызывают наибольшую сложность в МКТ. Разберемся с этим подробнее.

Представьте себе, что у вас есть бутылка с водой, которая закрыта крышкой и заполнена, например, наполовину. Молекулы воды постоянно вылетают из жидкости в воздух – это испарение. Но некоторые молекулы пара, летая, случайно попадают обратно в воду – это конденсация.

Сначала, когда пара в воздухе мало, испарение идет быстрее, чем конденсация (мало пара – мало молекул может вернуться обратно). Но со временем, пара становится всё больше, поэтому обратно в воду начинает попадать все больше и больше молекул пара. И вот в какой-то момент времени наступает такое состояние, при котором скорости испарения и конденсации становятся равными. Молекул водяного пара в жидкость возвращается столько же, сколько вылетает из неё. Это состояние называется **динамическое равновесие**, а сам пар называется насыщенным.

Постепенно пара в воздухе становилось больше и вот, при наступлении динамического равновесия, его количество в воздухе перестает меняться, ведь сколько молекул вылетает из жидкости, столько же и возвращается одновременно обратно. Пар как бы «полный» – больше молекул воды в воздух уже не влезет. Простыми словами:

насыщенный пар - это когда воздух уже не может взять в себя больше влаги при этой температуре т.е. он достиг некой предельной концентрации при данной температуре.

Почему мы делаем акцент на температуре? Давление насыщенного пара зависит только от температуры, потому что оно определяется равновесием между испарением и конденсацией, а обе эти скорости зависят от температуры и не зависят от того, сколько свободного места есть у пара.

Представим, что мы увеличили объём сосуда в два раза, оставив ту же температуру. Концентрация пара сразу упала вдвое (молекул столько же, а места больше). Испарение по-прежнему идёт с той же скоростью (температура не изменилась), а скорость конденсации уменьшилась (концентрация меньше, молекулы реже бьют о жидкость, возвращаются в нее). Равновесие нарушилось: испарение быстрее конденсации. Жидкость начинает дополнительно испаряться, пока концентрация (и давление) вновь не достигнет такого значения, что восстановится динамическое равновесие. Ну а поскольку скорость испарения не поменялась, то равновесие должно наступить при той же концентрации, что и ранее. Если же жидкости в сосуде мало, то она может вся испариться, но при этом пар не станет насыщенным.

Если же мы уменьшим объём, концентрация временно вырастет, конденсация станет быстрее испарения, и избыток пара сконденсируется - опять до той же самой концентрации.

Запомни!

1. Давление (а также плотность и концентрация) насыщенного пара зависит только от температуры. Если температура неизменна, то и перечисленные величины, характеризующие насыщенный пар, тоже не будут меняться.
2. Если в сосуде есть жидкость и мы медленно увеличиваем объём пара, то жидкость будет испаряться (масса жидкости уменьшается), количество пара будет увеличиваться (масса пара увеличивается), а сам пар будет оставаться насыщенным (его давление, плотность и концентрация меняться не будут).
3. Если в сосуде находится насыщенный пар и мы уменьшаем его объём при постоянной температуре, то он продолжит оставаться насыщенным, при этом часть пара конденсируется. Масса пара уменьшается, масса жидкости – увеличивается.

Ненасыщенный пар — это пар, который ещё не достиг предела своей концентрации при данной температуре. Простыми словами: воздух (или просто свободное пространство) может «вместить» ещё больше молекул этого пара без того, чтобы они начали конденсироваться обратно в жидкость.

Чтобы ненасыщенный пар стал насыщенным, нужно либо увеличить его концентрацию (добавить еще пар или уменьшить объём при постоянной температуре, пока он не станет насыщенным), либо понизить температуру.

Чем ниже температура, тем меньше молекул пара нужно для насыщения. Если взять ненасыщенный пар в закрытом сосуде и начать его охлаждать, то в какой-то момент его

концентрация окажется максимально возможной для этой новой, более низкой температуры. Пар станет насыщенным. Дальнейшее охлаждение вызовет конденсацию (появление капелек или росы). Такой процесс происходит в природе, когда появляется туман, роса, иней. Температура, при которой пар становится насыщенным, называется **точка росы**.

Состояние пара в воздухе характеризуют абсолютной и относительной влажностью.

Абсолютная влажность - это сколько водяного пара на самом деле содержится в 1 кубическом метре воздуха. Пример: если абсолютная влажность 10 г/м^3 , значит, в каждом кубометре воздуха летает 10 граммов водяного пара. Абсолютная влажность – плотность водяного пара

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Относительная влажность (или просто влажность) - это отношение текущего количества пара к тому максимально возможному количеству, которое может быть в этом воздухе при данной температуре (т.е. к плотности насыщенного пара при этой температуре)

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100\% = \frac{p}{p_n} \cdot 100\% = \frac{n}{n_n} \cdot 100\%.$$

Исходя из свойств насыщенных и ненасыщенных паров можно сказать, что влажность воздуха будет увеличиваться:

1. При добавлении к пару, содержащемуся в воздухе еще некоторого количества пара.
2. При изотермическом сжатии пара. Ненасыщенный пар ведет себя как идеальный газ – при изотермическом сжатии его концентрация и давление будут увеличиваться обратно пропорционально изменению объема до тех пор, пока пар не станет насыщенным. После этого его давление и концентрация перестанут изменяться (лишняя влага будет конденсироваться), а влажность $\varphi = 100\%$.
3. При охлаждении пара.

Пример. Относительная влажность воздуха в закрытом сосуде с поршнем равна 40%. Объем сосуда за счёт движения поршня медленно уменьшают при постоянной температуре. В конечном состоянии объем сосуда в 4 раза меньше начального. Выберите из предложенного перечня все верные утверждения, которые соответствуют результатам проведенных экспериментальных наблюдений, и укажите их номера.

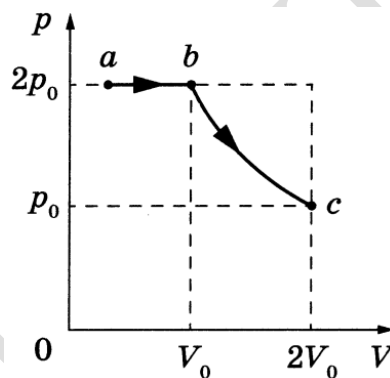
- 1) При уменьшении объема сосуда в 2,5 раза на стенках появляется роса.
- 2) Давление пара в сосуде всё время увеличивается.
- 3) В конечном и начальном состояниях масса пара в сосуде одинакова.
- 4) При уменьшении объема в 2 раза относительная влажность воздуха в сосуде стала равна 80%.
- 5) В конечном состоянии весь пар в сосуде сконденсировался.

Анализ и решение. При изотермическом уменьшении объема парциальное давление водяного пара растёт обратно пропорционально объёму, пока пар не станет

насыщенным. Начальная относительная влажность 40% означает, что давление пара составляет 0,4 от давления насыщенного пара. При уменьшении объёма в 2,5 раза давление пара увеличивается в 2,5 раза и достигает давления равного давлению насыщенного пара (а сам пар достигает максимальной концентрации, он становится насыщенным) и начинается конденсация (выпадает роса). При уменьшении объёма в 2 раза (что меньше 2,5) конденсации ещё нет, давление ненасыщенного пара становится в 2 раза больше, т.е. пар приблизился к предельному состоянию, к состоянию насыщенного, но пока не стал насыщенным, поэтому относительная влажность становится 80%. Давление пара после начала конденсации перестаёт расти, масса пара уменьшается, поэтому конечная масса пара меньше начальной. Весь пар не конденсируется, остаётся насыщенный пар. Исходя из вышесказанного, верными утверждениями будут являться утверждения 1 и 4.

Ответ: 14.

Пример. В цилиндрическом сосуде, закрытом подвижным поршнем, находится водяной пар и капля воды. С паром в сосуде при постоянной температуре происходит процесс $a \rightarrow b \rightarrow c$, pV -диаграмма которого представлена на рисунке. Из приведённого ниже списка выберите все верные утверждения относительно этого процесса.



- 1) В процессе $a \rightarrow b$ масса капли воды уменьшается.
- 2) В процессе $b \rightarrow c$ от пара отводится положительное количество теплоты.
- 3) В состоянии a водяной пар является ненасыщенным.
- 4) В процессе $a \rightarrow b$ внутренняя энергия пара постоянна.
- 5) В процессе $b \rightarrow c$ плотность пара уменьшается.

Анализ и решение. На участке $a \rightarrow b$ давление постоянно. Поскольку в сосуде есть капля воды, а температура постоянна, это возможно только для насыщенного пара: давление равно давлению насыщенного пара. При увеличении объёма (расширении) жидкость испаряется, при этом пар остается насыщенным, поэтому давление остается постоянным, а значит масса капли уменьшается (утверждение 1 верно, а утверждение 3 неверно).

На участке $b \rightarrow c$ давление убывает обратно пропорционально объёму ($pV = \text{const}$), что соответствует изотермическому процессу для ненасыщенного пара (идеальный газ). То есть при достижении состояния в точке b капля полностью испарилась, пар продолжает расширяться, воздух мог бы вместить в себя некоторое количество пара, но его негде взять. Получается, масса пара постоянна, объём растёт, следовательно, плотность пара

$$\rho = \frac{m}{V}$$

уменьшается (утверждение 5 верно).

Утверждение 2 неверно: при изотермическом расширении газ совершает положительную работу и получает тепло ($\Delta U = 0, Q = A > 0$), а не отдаёт.

Утверждение 4 неверно: внутренняя энергия пара в процессе $a \rightarrow b$ увеличивается, так как растёт количество вещества (масса пара) при неизменной температуре.

Ответ: 15.

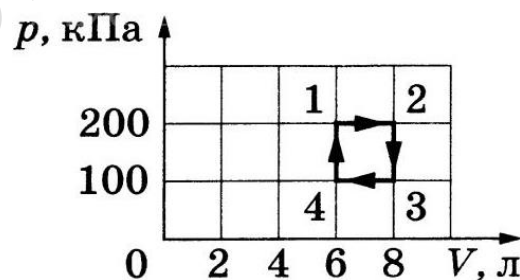
Тип 6. Анализ графиков (в том числе циклов) заданных в «стандартных» координатах pV, VT или pT .

Мы не будем приводить здесь теоретическую справку, поскольку уже достаточно хорошо описали необходимую теорию при разборе заданий 7 и 8. Отметим лишь, что нужно знать и уметь, чтобы эффективно решать эти задачи

1. Знать особенности протекания изопроцессов и понимать зависимости параметров газа друг от друга при одном неизменном.
2. Понимать принципы построения графиков изопроцессов в различных координатах. По виду кривой уметь определить, что за процесс происходит с газом.
3. Уметь применять первый закон термодинамики к различным процессам, в том числе, произвольным.

При решении заданий лучше анализировать каждое утверждение в отдельности. Разберемся на конкретных примерах.

Пример. С одноатомным идеальным газом происходит циклический процесс 1–2–3–4–1, pV -диаграмма которого представлена на рисунке. Максимальная температура, достигаемая газом в этом процессе, составляет 400 К. Масса газа постоянна. На основании анализа этого циклического процесса выберите все верные утверждения.



- 1) Работа, совершённая над газом при его изобарном сжатии, равна 100 Дж.
- 2) В процессе 2–3 газ получает положительное количество теплоты.
- 3) Работа газа за цикл равна 200 Дж.
- 4) Минимальная температура в циклическом процессе равна 200 К.
- 5) Количество теплоты, переданное газу при изохорном нагревании, равно 900 Дж.

Решение. Работа, совершенная над газом – это работа внешних сил. Она по величине равна работе газа и противоположна по знаку $A_{\text{вн}} = -A$. Изобарное сжатие – это процесс

3-4 (давление постоянно, объем уменьшается). Работа газа в изобарном процессе $A = p\Delta V$. Давление газа в процессе 3-4 $p = 100 \text{ кПа} = 100000 \text{ Па}$, изменение объема $\Delta V = -2 \text{ л} = -0,002 \text{ м}^3$ ($\Delta V < 0$ так как объем уменьшается)

$$A = 100000 \cdot (-0,002) = -200 \text{ Дж},$$

$$A_{\text{вн}} = -(-200) = 200 \text{ Дж}.$$

Утверждение 1 неверно.

Процесс 2-3 изохорный (V газа не изменяется). Газ в этом процессе работы не совершает. Внутренняя энергия газа $U = \frac{3}{2}pV$ уменьшается ($p \downarrow$), а значит изменение внутренней энергии на этом участке $\Delta U_{23} < 0$. Первый закон термодинамики в изохорном процессе $Q_{23} = \Delta U_{23}$. Откуда следует, что $Q_{23} < 0$, т.е. газ в процессе 2-3 отдает тепло. Утверждение 2 неверно.

Работа газа за цикл – площадь цикла. Найдем эту площадь (площадь прямоугольника со сторонами $200 \text{ кПа} - 100 \text{ кПа} = 100 \text{ кПа} = 100000 \text{ Па}$ и $8 \text{ л} - 6 \text{ л} = 2 \text{ л} = 0,002 \text{ м}^3$

$$A = 100000 \cdot 0,002 = 200 \text{ Дж}.$$

Утверждение 3 верное.

Из уравнения Менделеева-Клапейрона $pV = \nu RT$ следует, что минимальную температуру газ будет иметь когда оказывает минимальное давление и занимает минимальный объем (это соответствует состоянию газа 4). А максимальную температуру газ будет иметь, когда оказывает максимальное давление и занимает максимальный объем (это соответствует состоянию газа 2, $T_2 = 400 \text{ К}$). Мы можем сравнить температуры газа в состояниях 2 и 4 через уравнение Менделеева-Клапейрона, объединенный газовый закон или просчитав, как изменяется температура газа в изопроцессах 4-1 и 1-2. Мы возьмем объединённый газовый закон. Поскольку масса газа постоянна

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \Rightarrow \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_4 V_4}{T_4} \Rightarrow p_2 V_2 T_4 = p_4 V_4 T_2,$$

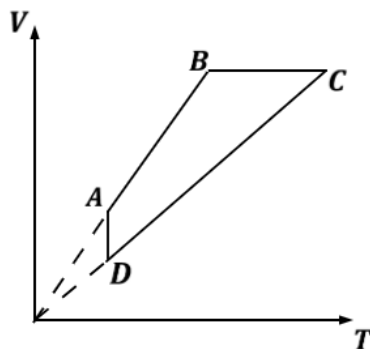
$$T_4 = \frac{p_4 V_4 T_2}{p_2 V_2}, \quad T_4 = \frac{100 \cdot 6 \cdot 400}{200 \cdot 8} = 150 \text{ К}.$$

Утверждение 4 неверно.

При изохорном нагревании давление должно увеличиваться ($V = \text{const}, p = \text{const} \cdot T \Rightarrow$ если $T \uparrow$, то и $p \uparrow$). Этому процессу соответствует процесс 4-1. В изохорном процессе газ работы не совершает $A_{41} = 0$. Из первого закона термодинамики $Q_{41} = \Delta U_{41} = U_1 - U_4 = \frac{3}{2}p_1 V_1 - \frac{3}{2}p_4 V_4 = \frac{3}{2} \cdot 200000 \cdot 0,006 - \frac{3}{2} \cdot 100000 \cdot 0,006 = 900 \text{ Дж}$. Утверждение 5 верное.

Ответ: 35.

Пример. На рисунке показан график циклического процесса, проведённого с одноатомным идеальным газом, в координатах $V - T$, где V – объём газа, T – абсолютная температура газа. Количество вещества газа постоянно.



Из приведённого ниже списка выберите все правильные утверждения, характеризующие отражённые на графике процессы.

- 1) Давление газа в процессе CD постоянно, при этом над газом совершается положительная работа.
- 2) В процессе DA давление газа увеличивается.
- 3) В процессе AB газ получает положительное количество теплоты.
- 4) В состоянии D концентрация атомов газа максимальна.
- 5) В процессе BC внутренняя энергия газа уменьшается.

Процесс CD действительно изобарный, потому что на графике $V(T)$ изобара - это луч из начала координат, так как объема газа уменьшается, то значит над газом совершается работа. Утверждение 1 верно.

Процесс DA - изотермический (температура газа не изменяется). В изотермическом процессе $pV = const$. Откуда следует, если объем газа увеличивается, то давление газа уменьшается. Утверждение 2 неверно.

Процесс AB - изобарный. Объем газа увеличивается, поэтому $A_{AB} > 0$. Температура газа увеличивается, значит и $\Delta U_{AB} > 0$. По первому закону термодинамики $Q_{AB} = A_{AB} + \Delta U_{AB} > 0$ - газ получает тепло. Утверждение 3 верное.

Концентрация молекул зависит от объема газа ($n = \frac{N}{V}$). В состоянии D газ занимает наименьший объем, значит концентрация атомов газа в этом состоянии максимальна. Утверждение 4 верное.

В процессе BC температура газа, а значит и его внутренняя энергия увеличиваются. Утверждение 5 неверно.

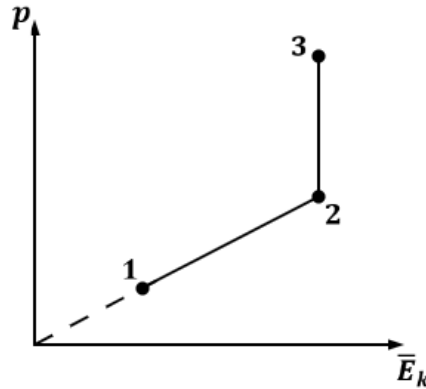
Ответ: 134.

Тип 7. Нетипичные графики.

Под этим названием типа задач скрывается то, что иногда на экзамене вам могут встретиться графики зависимостей, которые обычно не рассматривают в школьном курсе, например, зависимость давления от внутренней энергии. Здесь проверяется два момента. Во-первых, как хорошо вы знаете зависимости параметров газа или параметров молекул друг от друга (нужно хорошо знать формулы). Во-вторых, проверяется, как хорошо вы понимаете характер зависимостей, когда они линейные, квадратичные и так далее. Соответственно, здесь можно дать два совета: хорошо знайте

формулы и вам нужно научиться понимать по формуле какую зависимость она выражает и каким графиком эта зависимость может быть описана.

Пример. Один моль аргона участвует в процессе 1–2–3, представленном на графике зависимости давления p от средней кинетической энергии $\bar{E}_k$ теплового движения молекул.



Из приведённого ниже списка выберите все верные утверждения, характеризующие процессы на рисунке.

- 1) В процессе 1–2 концентрация аргона остаётся неизменной.
- 2) В процессе 1–2 аргон отдаёт положительное количество теплоты.
- 3) В процессе 2–3 аргон изотермически расширяется.
- 4) В процессе 2–3 аргон отдаёт окружающей среде положительное количество теплоты.
- 5) В процессе 2–3 температура аргона растёт.

Анализ и решение. В качестве зависимости, в этом задании, выбрана зависимость давления p от средней кинетической энергии $\bar{E}_k$ теплового движения молекул. Зависимость аналитически описывается формулой

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k.$$

На участке 1-2 зависимость, судя по графику, идущему от начала координат, представляет собой прямую пропорциональность. В математике, как вы привыкли, она выражается формулой $y = kx$, где k – постоянный коэффициент. У нас такой постоянный коэффициент – выражение $\frac{2}{3}n$. То есть

$$\frac{2}{3}n = \text{const} \Rightarrow n = \text{const}.$$

Концентрация газа на участке 1-2 не изменяется, а значит и не изменяется объем, т.е. 1-2 изохорный процесс (утверждение 1 верно). Получает или отдает газ энергию в процессе 1-2? Процесс изохорный, то работа газа равна нулю, значит $Q_{12} = \Delta U_{12}$. Внутренняя энергия газа $U = \frac{3}{2}pV$ при неизменном объеме и увеличивающемся давлении (а оно в процессе 1-2 увеличивается), тоже будет увеличиваться. А значит $\Delta U_{12} > 0$ и $Q_{12} > 0$ – газ не отдает, а получает тепло (утверждение 2 неверно). Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул зависит от температуры

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT.$$

В процессе 2-3 средняя кинетическая энергия теплового движения молекул не изменяется, значит и не изменяется температура, т.е. процесс 2-3 изотермический (утверждение 5 неверно). В изотермическом процессе $pV = \text{const}$. Откуда следует, если давление газа увеличивается, то объем газа уменьшается (утверждение 3 неверно, идет изотермическое сжатие). В изотермическом процессе внутренняя энергия газа не изменяется $\Delta U_{23} = 0$, тогда $Q_{23} = A_{23} < 0$. Работа газа отрицательна, т.к. его объем уменьшается (над газом совершают работу). Получается, что газ в этом процессе действительно отдаёт окружающей среде положительное количество теплоты (утверждение 4 верно).

Ответ: 14.

Тип 8. Два газа в теплоизолированном сосуде, разделенные неподвижной перегородкой.

Формулировка задания включает в себя герметичный теплоизолированный сосуд, который разделили неподвижной перегородкой, способной проводить тепло, на две равные части и в каждой части находится газы при разной температуре. Необходимо описать процессы, которые происходят в результате установления теплового равновесия в системе. При выполнении данного задания важно обратить внимание на следующие ключевые моменты

1. Перевод температур в одну шкалу. Как правило, в таких заданиях температура задана в разных единицах: одна по шкале Цельсия, вторая – по шкале Кельвина. Обязательно перевести градусы Цельсия в кельвины, чтобы корректно сравнивать и вычислять конечную температуру.
2. Сосуд герметичный и теплоизолированный, следовательно, нет обмена теплом с окружающей средой, но внутри перегородка теплопроводная, следовательно, теплообмен возможен только между двумя частями. Общая внутренняя энергия системы (газ в обеих частях) сохраняется.
3. Перегородка неподвижна, значит, объём первой и второй частей не меняется. Следовательно, никакой газ не совершает работу ни в одной из частей. Первое начало термодинамики для каждого газа упрощается до $\Delta U = Q$.
4. Следует помнить, что внутренняя энергия газа зависит только от температуры и количества вещества.
5. Направление теплообмена: горячий газ будет отдавать тепло, холодный - получать. Соответственно: Внутренняя энергия горячего газа уменьшается (температура падает). Внутренняя энергия холодного газа увеличивается (температура растёт).
6. Конечная температура может быть найдена из сохранения энергии. Поскольку внутренняя энергия системы не изменяется, то $U_{1\text{до}} + U_{2\text{до}} = U_{1\text{после}} + U_{2\text{после}}$, где $U_{1\text{до}}$ и $U_{1\text{после}}$ – внутренняя энергия первого газа в первоначальном состоянии и в момент установления теплового равновесия, а $U_{2\text{до}}$ и $U_{2\text{после}}$ – внутренняя энергия второго газа в первоначальном состоянии и в момент установления теплового равновесия соответственно.

7. Знаки теплоты. Поскольку работа не совершается, отданное/полученное количество теплоты равно изменению внутренней энергии. Горячий газ отдаёт тепло $Q < 0$. Холодный газ получает тепло $Q > 0$. Формулировка «Отдавал положительное количество теплоты» призвана вас запутать, на деле она означает, что тело отдает некоторое количество теплоты. Отрицательное количество теплоты, мы об этом уже говорили, как раз-таки означает, что тело отдает некоторое количество (положительное) энергии.

8. Самое главное: через достаточно большой промежуток времени произойдет установление теплового равновесия – температуры газов станут одинаковыми.

Пример. Герметичный теплоизолированный сосуд разделили неподвижной перегородкой, способной проводить тепло, на две равные части. В первую часть сосуда поместили некоторое количества аргона при температуре 328 К, а во вторую – такое же количество аргона при температуре 15 °С. Считая, что теплоёмкость сосуда пренебрежимо мала, выберите все утверждения, которые верно отражают изменения, происходящие с аргоном при переходе к тепловому равновесию.

- 1) Внутренняя энергия газа в первой части сосуда увеличилась.
- 2) Температура газа во второй части сосуда повысилась.
- 3) При теплообмене газ в первой части сосуда отдавал положительное количество теплоты, а газ во второй части сосуда его получал.
- 4) Через достаточно большой промежуток времени температура газов в обеих частях сосуда стала одинаковой и равной 25 °С.
- 5) В результате теплообмена газ в первой части сосуда совершил положительную работу.

Анализ и решение. Температура аргона во второй половине сосуда $T = 15 + 273 = 288$ К. Газ в этой половине сосуда имеет меньшую температуру, поэтому при установлении теплового равновесия он будет нагреваться (он получит некоторое количество теплоты, его внутренняя энергия увеличится). Газ в первой половине сосуда наоборот будет охлаждаться (он отдает некоторое количество теплоты, его внутренняя энергия уменьшается). Утверждения 1 неверное, а утверждения 2 и 3 верные. Найдём температуру газа через закон сохранения энергии, учитывая, что количество аргона в обеих частях сосуда одинаково

$$\frac{3}{2} \nu R T_1 + \frac{3}{2} \nu R T_2 = \frac{3}{2} \nu R T + \frac{3}{2} \nu R T,$$

$$T_1 + T_2 = 2T \Rightarrow T = \frac{T_1 + T_2}{2},$$

$$T = \frac{328 + 288}{2} = 308 \text{ К.}$$

$$t = 308 - 273 = 35^\circ\text{C}.$$

Утверждение 4 неверно. Утверждение 5 также неверно, мы об этом говорили выше.

Ответ: 23.

Тип 9. Сравнение параметров газа или молекул газа, содержащихся в разных сосудах.

В заданиях этого типа необходимо сравнить параметры двух газов, которые поместили в два разных сосуда. Можно предложить алгоритм действий при решении подобных тестовых заданий:

- 1) Перевести все температуры в Кельвины.
- 2) Выписать отдельно для каждого газа: ν, T, M, V (если не даны, но сказано, что одинаковы).
- 3) Для каждого утверждения записать формулу искомой величины через известные параметры.
- 4) Вычислить отношение или сравнить численно (без подстановки чисел, если можно сократить).

Пример. В двух сосудах одинакового объёма находятся разреженные газы. В первом сосуде находится 2 моль гелия при температуре 127°C , во втором сосуде находится 1 моль аргона при температуре 300 К. Выберите все верные утверждения о параметрах состояния указанных газов.

- 1) Абсолютная температура газа во втором сосуде выше, чем в первом.
- 2) Среднеквадратичная скорость молекул газа в первом сосуде больше, чем во втором.
- 3) Давления газов в сосудах одинаковы.
- 4) Концентрация газа в первом сосуде в 2 раза меньше, чем во втором.
- 5) Отношение средней кинетической энергии теплового движения молекул аргона к средней кинетической энергии теплового движения молекул гелия равно 0,75.

Анализ и решение. Температура аргона во второй половине сосуда $T = 127 + 273 = 400$ К. Видим, что утверждение 1 неверно ($T_1 = 400 \text{ К} > T_2 = 300 \text{ К}$).

Газ в первом сосуде: $\nu_1 = 2$ моль, $T_1 = 400 \text{ К}$, $M_1 = 4 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, V .

Газ во втором сосуде: $\nu_2 = 1$ моль, $T_2 = 300 \text{ К}$, $M_2 = 40 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, V .

Сравним средние квадратичные скорости движений молекул газов

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

$$\frac{\bar{v}_{\text{кв1}}}{\bar{v}_{\text{кв2}}} = \sqrt{\frac{3RT_1}{M_1}} : \sqrt{\frac{3RT_2}{M_2}} = \sqrt{\frac{3RT_1}{M_1}} \cdot \sqrt{\frac{M_2}{3RT_2}} = \sqrt{\frac{T_1}{M_1} \cdot \frac{M_2}{T_2}} = \sqrt{\frac{400}{4} \cdot \frac{40}{300}} \approx 3,65$$

Среднеквадратичная скорость молекул газа в первом сосуде примерно в 3,65 раз больше, чем во втором. Утверждение 2 верно.

Выразим давление газа из уравнения Менделеева-Клапейрона и сравним давление газов в сосудах

$$p = \frac{\nu RT}{V},$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\nu_1 RT_1}{V} : \frac{\nu_2 RT_2}{V} = \frac{\nu_1 RT_1}{V} \cdot \frac{V}{\nu_2 RT_2} = \frac{\nu_1 T_1}{\nu_2 T_2} = \frac{2 \cdot 400}{1 \cdot 300} = \frac{8}{3} \approx 2,67 > 1.$$

Давление газа в первом сосуде больше. Утверждение 3 неверно.

Концентрацию сравним через давление и температуру

$$p = nkT \Rightarrow n = \frac{p}{kT},$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{p_1}{kT_1} : \frac{p_2}{kT_2} = \frac{p_1}{kT_1} \cdot \frac{kT_2}{p_2} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \frac{8}{3} \cdot \frac{300}{400} = 2.$$

Концентрация газа в первом сосуде в 2 раза **больше**, чем во втором. Утверждение 4 неверно.

Сравним средние кинетические энергии теплового движения молекул

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT,$$

$$\frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_1} = \frac{\frac{3}{2} kT_2}{\frac{3}{2} kT_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{300}{400} = 0,75.$$

Утверждение 5 верно.

Ответ: 25.

Тип 10. Особенности кипения.

При решении задач с кипением воды, парообразованием, теплопередачей, обращайтесь внимание на следующие ключевые моменты:

1. Различайте этапы процесса. Нагревание до кипения: температура воды растёт, давление насыщенного пара увеличивается, испарение идёт с поверхности, но пар может быть ненасыщенным. Кипение: температура постоянна (при фиксированном внешнем давлении), пар над жидкостью – насыщенный, его давление равно внешнему давлению.

2. Условия кипения. Кипение начинается, когда давление насыщенного пара становится равным внешнему давлению. Внешнее давление складывается из атмосферного и давления, создаваемого крышкой (если крышка тяжёлая или герметичная). Чаще всего крышка «лёгкая» – значит, она не создаёт избыточного давления, и давление под крышкой равно атмосферному (760 мм рт. ст. или 10^5 Па). Следовательно, температура кипения – 100 °С.

3. Поведение пара при кипении. Над поверхностью кипящей воды пар всегда насыщенный. Его относительная влажность 100%. Плотность насыщенного пара и его парциальное давление зависят только от температуры. При кипении температура постоянна, следовательно, плотность и давление постоянны. Если пар может выходить из-под крышки (крышка не герметична), то количество пара над водой не накапливается, но состояние остаётся насыщенным.

4. Теплопередача через дно кастрюли. Дно кастрюли нагревается пламенем. Чтобы тепло передавалось воде, температура дна должна быть выше температуры кипения воды. Иначе теплообмен прекратится. Поэтому, если есть утверждения о том, что температура дна не превышает 90°C или даже 100°C , физически неверны.

5. Анализ формулировок. Обращайте внимание на временные указатели: «в ходе нагревания до кипения», «в процессе кипения», «после длительного кипения». Это определяет, о каком этапе идёт речь. Слова «относительная влажность», «парциальное давление», «плотность насыщенного пара» требуют чёткого знания определений и формул.

Пример. Стальную кастрюлю, наполовину наполненную водой и закрытую лёгкой крышкой, поставили на огонь, воду в ней довели до кипения и кипятили в течение некоторого времени. Атмосферное давление в помещении составляло 760 мм рт. ст. Выберите все верные утверждения, описывающие характеристики воды, водяного пара и кастрюли в процессе кипения.

- 1) Относительная влажность воздуха под крышкой в процессе кипения воды уменьшается.
- 2) Температура воды в кастрюле в процессе кипения увеличивается.
- 3) Парциальное давление водяных паров под крышкой увеличивается в ходе нагревания воды до температуры кипения.
- 4) Температура в толще дна кастрюли в ходе кипения не превышает 90°C .
- 5) Плотность насыщенных водяных паров над поверхностью воды при кипении остаётся постоянной.

Анализ и решение. Проанализируем каждое утверждение.

Утверждение 1 неверно. При кипении пар над водой насыщенный, относительная влажность 100% и не меняется.

Утверждение 2 неверно. При кипении температура постоянна (100°C), пока есть жидкость.

Утверждение 3 верно. При нагревании давление насыщенного пара растёт с температурой, пока не достигнет атмосферного.

Утверждение 4 неверно. Дно нагревается от пламени, его температура выше 100°C , иначе тепло не передавалось бы воде.

Утверждение 5 верно. При кипении температура постоянна, следовательно, плотность насыщенного пара постоянна.

Ответ: 35.

Тип 11. Обработка табличных данных.

Заданная таблица включает три-четыре и более состояний, и при этом значения какого-то параметра (например, давления) строго постоянны во всех строках, то с высокой вероятностью процесс был изобарным (или близким к нему). Однако, строго говоря,

нельзя исключать, что между точками давление отклонялось, но в измеряемые моменты снова оказывалось тем же.

Как же быть? Если в таких заданиях даётся не просто таблица, а описание: «газ нагревали в цилиндре под подвижным поршнем при неизменном внешнем давлении» - тогда однозначно изобарный процесс. Или: «газ в герметичном баллоне» - изохорный процесс. Если же ничего не сказано, а даны только точки, то правильный ответ на вопрос «какой это процесс?» - «нельзя определить».

Однако, стоит отметить, что на практике такие тонкости обычно опускают, и если, например, в таблице для нескольких точек подряд давление одно и то же, то подразумевается, что происходит изобарный процесс.

Как действовать в таких заданиях? Наиболее эффективная стратегия: сначала выделить участки, где не изменяется какой-либо параметр, характеризующий состояние газа, а затем последовательно проверить каждое утверждение.

Пример. При изучении процессов, происходящих с гелием, ученик занёс в таблицу результаты измерения температуры и давления одного и того же количества газа в различных равновесных состояниях. Выберите все верные утверждения, приведённых ниже, которые соответствуют результатам этих опытов? Газ считать идеальным.

№ состояния	1	2	3	4	5	6	7
p , кПа	100	90	75	50	55	75	100
t , °C	27	27	27	27	57	177	327

- 1) Объём газа в состоянии 4 в 2 раза меньше объёма газа в состоянии 1.
- 2) В состояниях 4–7 объём газа был одинаковым.
- 3) Внутренняя энергия газа в состоянии 6 в 3 раза больше, чем в состоянии 5.
- 4) При переходе от состояния 2 к состоянию 3 в ходе изотермического процесса газ получал тепло.
- 5) При переходе от состояния 5 к состоянию 6 в ходе изохорного процесса газ совершал работу.

Анализ и решение. Сначала переведем температуру в кельвины.

№ состояния	1	2	3	4	5	6	7
p , кПа	100	90	75	50	55	75	100
t , °C	27	27	27	27	57	177	327
T , К	300	300	300	300	330	450	600

Сразу можно проверить справедливость утверждения 3. Температура газа при переходе из состояния 5 в состояние 6 увеличивается, но не в 3 раза. Значит внутренняя энергия тоже увеличилась, но не в 3 раза. Это утверждение неверно.

Мы видим, что в состояниях 1, 2, 3 и 4 температура газа одинакова (возможно это изотермический процесс). Если температура газа одинакова, а давление уменьшается, то это означает, что объём газа увеличивается. Первое утверждение точно неверно, т.к. там утверждается, что объём газа становится меньше.

Проверим сразу же справедливость утверждения 4. Вызывает вопросы, то что это процесс изотермический. Так как $T_2 = T_3$, то $\Delta U_{23} = 0$ независимо от того, какой процесс происходил с газом (изотермический или нет) при переходе из состояния 2 в состояние 3. Объем газа, как мы уже сказали ранее, увеличивается, значит $A_{23} > 0$. Из второго закона термодинамики $Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23} = A_{23} > 0$. При переходе от состояния 2 к состоянию 3 газ однозначно получал тепло. Был ли процесс изотермическим? Оставим пока этот вопрос открытым.

Проверим, был ли одинаковым объём газа в состояниях 4-7. Для этого нужно составить отношение $\frac{p}{T}$ и посмотреть, будет ли оно одинаковым? То есть ведет ли себя газ, как будто совершается изохорный процесс

$$\begin{aligned}\frac{p_4}{T_4} &= \frac{p_5}{T_5} = \frac{p_6}{T_6} = \frac{p_7}{T_7}, \\ \frac{50}{300} &= \frac{55}{330} = \frac{75}{450} = \frac{100}{600} \Rightarrow \frac{50}{6 \cdot 50} = \frac{55}{6 \cdot 55} = \frac{75}{6 \cdot 75} = \frac{100}{6 \cdot 100} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{1}{6} = \frac{1}{6} = \frac{1}{6} = \frac{1}{6}.\end{aligned}$$

Мы получили верное равенство, поэтому с уверенностью можно сказать, что объем газа в состояниях 4-7 был одинаковым, но нельзя утверждать, что процесс был изохорным. Утверждение 2 верно.

Последнее утверждение в принципе неверно. В изохорном процессе газ работы не совершает.

Поскольку утверждения 1,3,5 неверны, то теперь можно сказать точно (должно быть минимум два верных утверждения), что утверждение 4 верное, т.е. предполагается, что с газом происходил изотермический процесс.

Ответ: 24.

Мы видим, что утверждения составлены таким образом, что можно решить задание, не имея полного представления по дискретным значениям о том, действительно ли газ участвует в изопроцессах.

Тип 12. Сравнение параметров газа при изменении их количества.

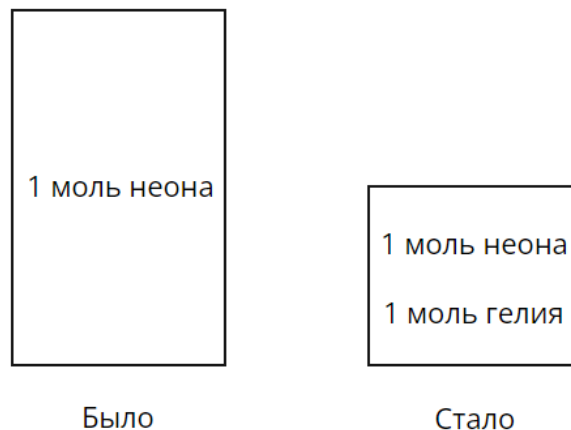
Это задание по способу решение похоже на задание с полупроницаемой перегородкой. Поэтому подробно, расписывать подходы к решению мы не будем, а покажем все на конкретном примере.

Пример. Объём сосуда, содержащего 1 моль неона, уменьшили вдвое и добавили в сосуд 1 моль гелия. Температура в сосуде поддерживается постоянной. Выберите из предложенного списка все утверждения, которые верно отражают результаты этого опыта.

- 1) Концентрации неона и гелия в сосуде одинаковы.
- 2) Внутренняя энергия неона уменьшилась.
- 3) Плотность газа в сосуде не изменилась.
- 4) Давление в сосуде увеличилось.

5) Парциальное давление неона не изменилось.

Анализ и решение. Составим схему, на которой покажем, что произошло.



Анализируем истинность утверждений (зачастую это понятно и без формул, интуитивно).

1. Концентрация молекул

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_A}{V}.$$

Количество неона и гелия одинаково, они занимают одинаковый объем, значит имеют одинаковую концентрацию. Утверждение 1 верно.

2. Внутренняя энергия

$$U = \frac{3}{2} \nu RT.$$

Количество неона и его температура не поменялись, значит и не изменилась его внутренняя энергия. Утверждение 2 неверно.

3. Имеется в виду, плотность не отдельного газа, а плотность газа в сосуде в целом. Плотность газа

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Масса газа в сосуде увеличилась (туда добавили еще газ, пусть другой, но добавили), а объем уменьшили. Значит плотность газа увеличится. Утверждение 3 неверно.

4. Из предыдущего пункта следует, что давление газа действительно увеличилось. Газ стало больше и при этом он занимает меньший объем. Естественно число соударений молекул газа со стенками сосуда возрастет, поэтому увеличится и давление газа. Утверждение 4 верно.

5. Температура неона и его количество остались неизменными, но при этом он стал занимать меньший объем. Из уравнения Менделеева-Клапейрона $pV = \nu RT$ следует, что парциальное давление неона увеличится. Утверждение 5 неверно.

Ответ: 14.

Друзья! Как и любой другой проект, мы не можем существовать в этом мире без денег. Все материалы нашего сайта, канала или группы в Вк абсолютно бесплатны и без подписок. Чтобы мы имели возможность развиваться, например, приобрести лабораторное оборудование и записывать для вас красивые ролики о физике, мы просим вас помочь нашему проекту любой посильной для вас суммой!

Для отправки доната нажмите на ссылку

[Отправить донат](#)

или отсканируйте QR-код



С уважением к вам, авторы материалов проекта «Физика-онлайн».