

# Задание №21

## МКТ-качественная задача

1. В эксперименте установлено, что при температуре воздуха в комнате  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  на стенке стакана с холодной водой начинается конденсация паров воды из воздуха, если снизить температуру стакана до  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По результатам этих экспериментов определите абсолютную и относительную влажность воздуха. Для решения задачи воспользуйтесь таблицей. Поясните, почему конденсация паров воды в воздухе может начинаться при различных значениях температуры. Давление и плотность насыщенного водяного пара при различной температуре показано в таблице:

$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	7	9	11	12	13	14	15	16	19	21	23	25	27	29	40	60
$p, \text{ гПа}$	10	11	13	14	15	16	17	18	22	25	28	32	36	40	74	200
$\rho, \text{ г/м}^3$	7,7	8,8	10,0	10,7	11,4	12,11	12,8	13,6	16,3	18,4	20,6	23,0	25,8	28,7	51,2	130,5

t, °C	7	9	11	12	13	14	15	16	19	21	23	25	27	29	40	60
p, гПа	10	11	13	14	15	16	17	18	22	25	28	32	36	40	74	200
ρ, г/м³	7,7	8,8	10,0	10,7	11,4	12,11	12,8	13,6	16,3	18,4	20,6	23,0	25,8	28,7	51,2	130,5

Водяной пар в воздухе становится насыщенным при температуре 12 °С.

Значит, давление  $p$  водяного пара в воздухе равно давлению насыщенного пара при температуре 12 °С, из таблицы 14 гПа.

Абсолютная влажность равна плотности водяных паров.

Первое состояние: насыщенный пар при 12 °С. Второе: пар при 23 °С.

Пар охлаждается от 23 до 12 °С изобарически, поэтому  $p_2 = p_1 = 14$  гПа

Давление  $p_0$  насыщенного водяного пара при температуре 23 °С равно 28 гПа.

Относительная влажность воздуха:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\% = \frac{14}{28} \cdot 100\% = 50\%$$

$$\text{Отсюда: } p_1 = \frac{\rho_{\text{нп}12^\circ\text{C}}}{M} RT_1 \quad p_2 = \frac{\rho_2}{M} RT_2$$

Плотность насыщенного пара при 12 °С равна  $\rho_{\text{нп}12^\circ\text{C}} = 10,7$  г/м³

$$\text{Отсюда: } \rho_2 = \rho_{\text{нп}12^\circ\text{C}} \frac{T_1}{T_2} = 10,7 \cdot \frac{285 \text{ K}}{296 \text{ K}} \approx 10,3 \text{ г/м}^3$$

Конденсация паров воды происходит при условии равенства давления водяного пара, имеющегося в воздухе, давлению насыщенного водяного пара при данной температуре воздуха.

Давление насыщенного водяного пара зависит от температуры. Поэтому при разной плотности водяного пара в воздухе температура начала конденсации пара (точка росы) оказывается различной.

2. В сельской местности люди обычно живут в деревянных домах. Трубы, по которым в дом подаётся из уличного водопровода холодная вода, имеющая температуру  $8\text{—}10^\circ\text{C}$ , опытные хозяева теплоизолируют и защищают от влаги, оборачивая влагостойкими материалами с низкой теплопроводностью. Это, наряду с проветриванием, позволяет уменьшить сырость в доме. Объясните, опираясь на известные физические законы, зачем это делается и почему описанные процедуры уменьшают сырость.

Так как по трубам течёт холодная вода, поверхность труб имеет температуру, близкую к  $8\text{—}10^\circ\text{C}$ . Температура воздуха в жилом доме превышает эту температуру.

Абсолютная влажность воздуха в доме обычно довольно высокая.

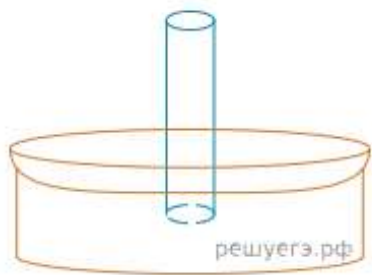
Если оказывается, что температура поверхности труб ниже точки росы, то водяной пар начинает конденсироваться на холодных трубах.

При этом на трубах образуются водяные капли, которые затем падают на пол. Плохое проветривание замедляет испарение воды с пола и препятствует удалению водяных паров.

Оборачивание труб слоем тепло и влагоизолирующего материала позволяет ликвидировать резкий перепад температур между поверхностью трубы и воздухом в доме.

Наружная поверхность теплоизолятора имеет температуру, близкую к температуре воздуха, а внутренняя поверхность - близкую к температуре воды в трубе. При этом образование конденсата на трубах становится невозможным, и сырость в доме уменьшается. Дополнительно она уменьшается за счёт проветривания, при котором влажный воздух удаляется и заменяется более сухим наружным.

3. Широкоую стеклянную трубку длиной около полуметра, запаянную с одного конца, целиком заполнили водой и установили вертикально открытым концом вниз, погрузив низ трубки на несколько сантиметров в тазик с водой (см. рис.). При комнатной температуре трубка остается целиком заполненной водой. Воду в тазике медленно нагревают. Где установится уровень воды в трубке, когда вода в тазике начнет закипать? Ответ поясните, используя физические закономерности.



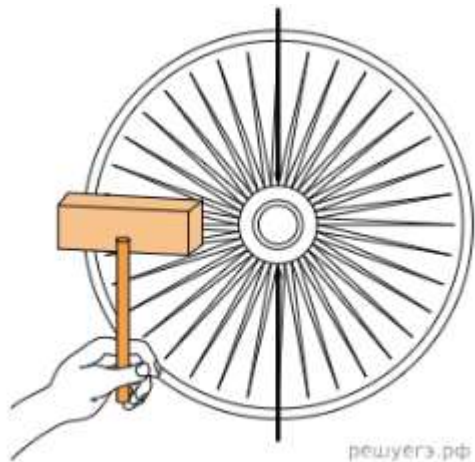
При комнатной температуре вода занимает весь объем трубки и не выливается из нее, потому что давление насыщенного водяного пара при комнатной температуре очень невелико и над водой возникнет «торричеллиева пустота», заполненная насыщенным водяным паром, только если высота водяного столба будет примерно 10 метров.

С ростом температуры воды давление ее насыщенного пара растет, пока при температуре кипения не сравняется с внешним атмосферным давлением.

Поэтому, когда температура воды в трубке приблизится к температуре кипения, над водой в трубке появится «торричеллиева пустота», заполненная насыщенным водяным паром. С дальнейшим повышением температуры уровень воды в трубке будет понижаться.

При температуре кипения достигается равенство давления насыщенного водяного пара в трубке и атмосферного давления, поэтому уровень воды в трубке и в тазике одинаков.

4. Велосипедное колесо, у которого вместо металлических спиц обод удерживают натянутые резинки, установлено в вертикальной плоскости и может свободно вращаться вокруг своей горизонтальной оси, зажатой в штативе. К неподвижному колесу подносят слева мощную лампу и начинают нагревать резиновые «спицы» (см. рис.). Резина, в отличие от металла, при нагревании не расширяется, а сжимается. Опишите, опираясь на известные физические законы, что будет происходить с резинками, и как колесо будет двигаться.



Когда лампа нагреет резинки слева от оси колеса, они сожмутся и сдвинут обод колеса направо.

При этом центр тяжести колеса сместится вправо, и появится момент силы тяжести относительно оси колеса, стремящийся повернуть колесо вправо.

Равновесие колеса нарушится, и оно начнёт вращаться по часовой стрелке.

При вращении колеса нагретые резинки будут удаляться от лампы и охлаждаться за счет теплообмена с окружающей средой, а ненагретые резинки будут приближаться к лампе и нагреваться её излучением.

Описанные процессы будут повторяться. В результате колесо будет непрерывно вращаться, если нагретые резинки за время его оборота будут успевать достаточно охладиться.

5. В прочный сосуд объёмом  $V = 2$  л с герметично закрывающейся крышкой налили  $1,71$  кг воды при температуре  $T = 0^\circ\text{C}$  и при нормальном атмосферном давлении  $p = 1$  атм, закружили крышку и поставили нагреваться на газовую плиту. Когда вода нагрелась до  $100^\circ\text{C}$ , сосуд переместили в морозильник и дождались, когда вода полностью замёрзнет. Какое давление при этом установится в сосуде? Нарисуйте примерный график зависимости давления  $p$  в этом сосуде, выраженного в атмосферах, от времени  $t$ . Давлением паров воды при температуре  $T = 0^\circ\text{C}$  по сравнению с  $1$  атм можно пренебречь, как и тепловым расширением воды при её нагревании. Значения давления в характерных точках, используемых для построения графика, можно округлять до десятых долей атм. Плотность льда равна  $900$  кг/м<sup>3</sup>.

Начальное давление в сосуде равно 1 атм.

После нагревания воды до  $100^\circ\text{C}$  давление её паров возросло до 1 атм, а давление воздуха при постоянном объёме увеличилось по закону Шарля в  $T_2/T_1 = 373/273 \approx 1,366$  раза, примерно 1,4 атм.

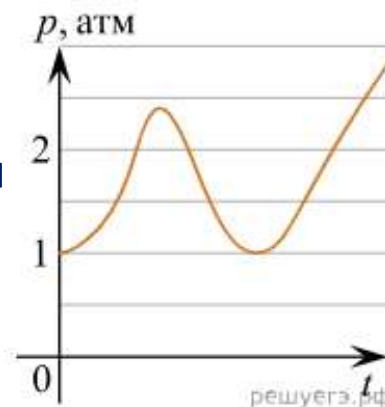
При этом суммарное давление воздуха и паров воды при  $100^\circ\text{C}$  по закону Дальтона стало равным около 2,4 атм.

При охлаждении сосуда в морозильнике до  $0^\circ\text{C}$  давление паров воды уменьшилось, давление воздуха сначала вернулось к исходному  $p = 1$  атм, а затем по мере замерзания воды объём, занимаемый воздухом, уменьшался, а его давление увеличивалось вплоть до момента, когда вся вода замёрзла.

Плотность воды  $1000 \text{ кг/м}^3$ , объём 1,71 кг воды был равен 1,71 л, а плотность получившегося льда  $900 \text{ кг/м}^3$ , и его объём равен 1,9 л, то есть объём воздуха уменьшился с  $V_1 = 0,29$  л до  $V_2 = 0,1$  л.

По закону Бойля–Мариотта при постоянной температуре  $T = 0^\circ\text{C}$  давление воздуха стало равным  $p' = pV_1/V_2 \approx 2,9$  атм, а давление в сосуде.

Отсюда примерный график зависимости давл  
 $t$ :



е давление в  
где от времени

6. В цилиндрическом сосуде под поршнем длительное время находятся вода и ее пар. Поршень начинают выдвигать из сосуда. При этом температура воды и пара остается неизменной. Как будет меняться при этом масса жидкости в сосуде? Ответ поясните, указав, какие физические закономерности вы использовали для объяснения.

Масса жидкости в сосуде будет уменьшаться.

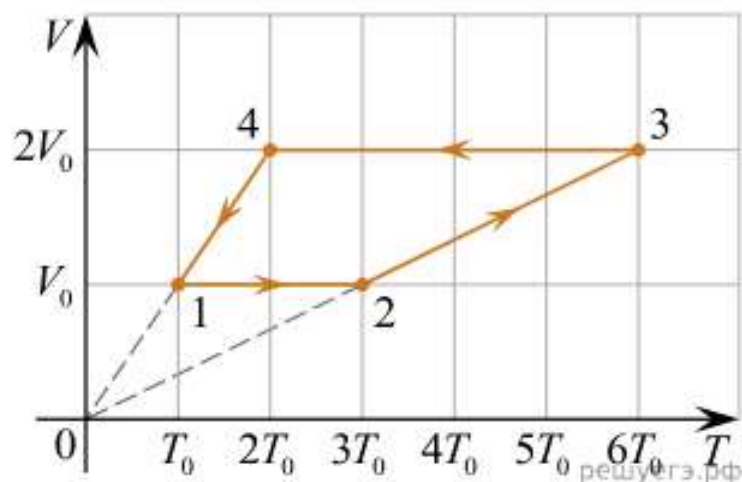
Вода и водяной пар находятся в закрытом сосуде длительное время, поэтому водяной пар является насыщенным.

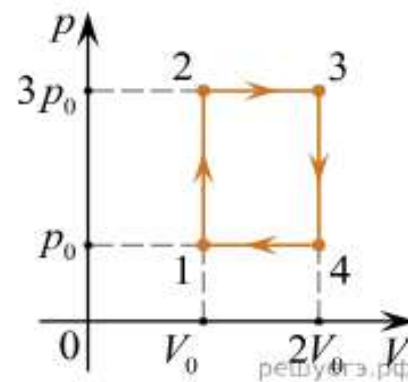
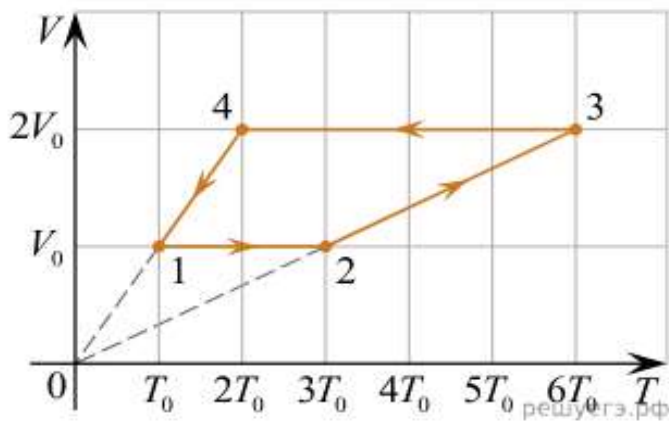
При выдвигании поршня происходит изотермическое расширение пара, давление и плотность насыщенного пара в этом процессе не меняются.

Значит, будет происходить испарение жидкости и масса жидкости в сосуде будет уменьшаться.



7. 1 моль разреженного гелия участвует в циклическом процессе 1–2–3–4–1, график которого изображён на рисунке в координатах  $V$ – $T$ , где  $V$  — объём газа,  $T$  — абсолютная температура. Постройте график цикла в координатах  $p$ – $V$ , где  $p$  — давление газа,  $V$  — объём газа. Опираясь на законы молекулярной физики и термодинамики, объясните построение графика. Определите, во сколько раз работа газа в процессе 2–3 больше модуля работы внешних сил в процессе 4–1.





Перестроим график цикла в координатах  $p-V$

Процесс 1–2 является изохорным, в нём абсолютная температура газа увеличилась в 3 раза, а значит, согласно закону Шарля  $\frac{p}{T} = const$  и давление газа увеличилось в 3 раза.

Процесс 2–3 является изобарным, т.к. его график в координатах  $V-T$  проходит через начало координат  $\frac{V}{T} = const$ . В этом процессе и объём, и абсолютная температура газа увеличились в 2 раза.

В процессе 3–4 газ изохорно уменьшил свою абсолютную температуру и давление в 3 раза, а в процессе 4–1 изобарно вернулся в исходное состояние.

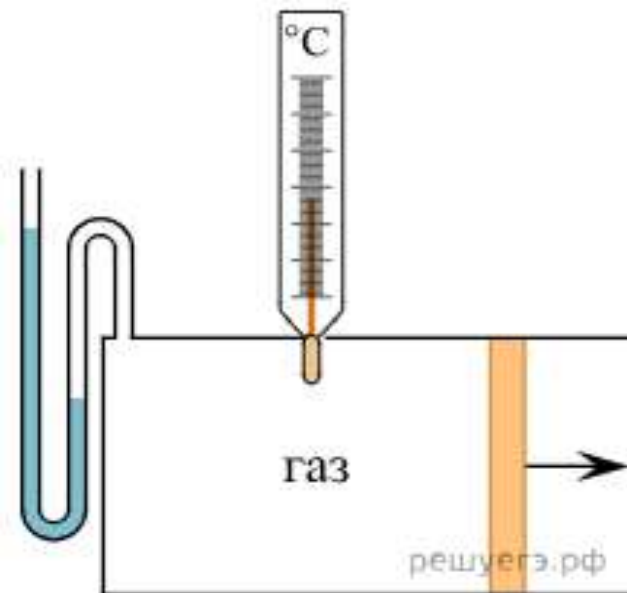
Из графика: работа газа в процессе 2–3  $A_{23} = 3p_0(2V_0 - V_0) = 3p_0V_0$

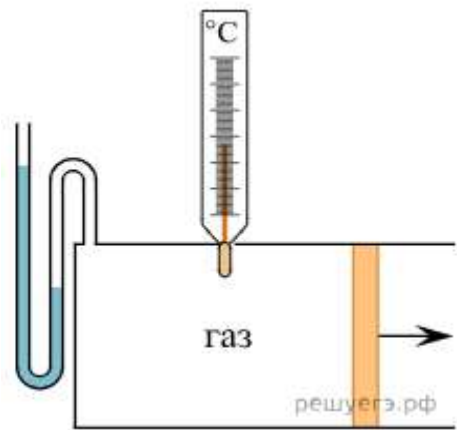
Модуль работы внешних сил в процессе 4–1  $|A_{41}| = p_0(2V_0 - V_0) = p_0V_0$ .

Таким образом, искомое отношение  $\frac{A_{23}}{|A_{41}|} = 3$ .

Ответ: 3.

8. В цилиндрическом сосуде, закрытом подвижным поршнем, находится идеальный газ (см. рис.). Давление и температура в сосуде измеряются при помощи  $U$ -образного манометра с вертикальными коленами, в который налита жидкость, и спиртового термометра. Стенки сосуда и поршень теплоизолированы, теплообменом газа с манометром можно пренебречь, а термометр обладает очень малой теплоёмкостью. В исходном состоянии поршень неподвижен, газ находится в термодинамическом равновесии. Поршень начинают медленно перемещать в направлении, показанном стрелкой. Как при этом будут изменяться показания манометра и термометра? Ответ поясните, указав, какие физические явления и закономерности Вы использовали для объяснения.





При перемещении поршня вправо объём  $V$  газа увеличивается. Поэтому газ совершает положительную работу:  $\Delta A > 0$ .

Так как по условию, газ практически не обменивается теплотой с окружающими его телами, и расширение происходит очень медленно. Поэтому процесс расширения газа можно считать равновесным и адиабатическим:  $\Delta Q = 0$ .

В соответствии с первым законом термодинамик:  $\Delta Q = \Delta U + \Delta A = 0$ .

Отсюда изменение внутренней энергии газа  $\Delta U = -\Delta A < 0$ .

Внутренняя энергия  $\nu$  молей идеального газа, обладающего молярной теплоёмкостью  $c_V$  в равновесном состоянии:  $U = c_V \nu T$ , где  $T$  — абсолютная температура газа.

Поэтому  $\Delta U = c_V \nu \Delta T < 0$ .

Значит, температура газа уменьшается, и столбик спирта в термометре будет опускаться.

По уравнению Менделеева-Клапейрона, давление газа в равновесном состоянии:

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

Т.к. объём газа увеличивается, а его температура уменьшается, давление газа будет уменьшаться.

Значит, разность высот столбиков жидкости в коленях манометра будет уменьшаться — в левой трубке столбик жидкости будет опускаться, а в правой — подниматься.