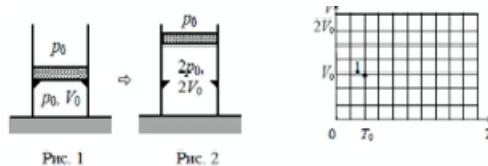


## Занятие 4 - Молекулярная физика. Термодинамика

Курс читает: Усков Владимир Владимирович - доцент кафедры общей физики МФТИ.

### Задача 1

В вертикальном цилиндре с гладкими стенками под массивным металлическим поршнем находится идеальный газ. В первоначальном состоянии 1 поршень опирается на жесткие выступы на внутренней стороне стенок цилиндра (рис.1), а газ занимает объем  $V_0$ ; и находится под давлением  $p_0$  равным внешнему атмосферному. Его температура в этом состоянии равна  $T_0$ . Газ медленно нагревают, и он переходит из состояния 1 в состояние 2, в котором давление газа равно  $2p_0$ , а его объем равен  $2V_0$  (рис.2). Количество вещества газа при этом не меняется. Постройте график зависимости объема газа от его температуры при переходе из состояния 1 в состояние 2. Ответ поясните, указав, какие явления и закономерности Вы использовали для объяснения.



### Решение

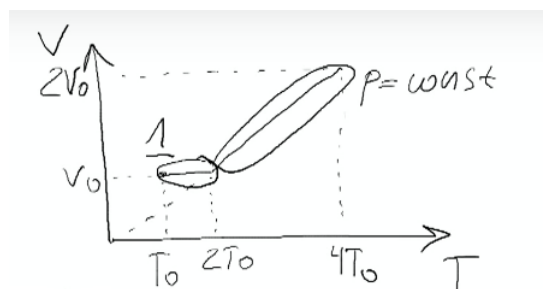
В ЕГЭ эта задача идет под номером 28. Рассмотрим следующее официальное решение.

Когда мы начинаем нагревать газ, сначала происходит изохорический процесс, потому что поршень тяжелый и пока сила давления его не сможет поднять, он будет лежать на уступах. Затем, когда разность давлений над поршнем и под поршнем будет равна силе тяжести, поршень придет в движение. Запишем уравнения Клапейрона–Менделеева для газа в состояниях 1 и 2.

$$P_0V_0 = \nu RT_0 \quad 2P_02V_0 = \nu RT_2$$

Отсюда не трудно найти, что  $T_2 = 4T_0$ . Далее из равенства сил находится температура процесса, когда процесс становится изобарическим  $T_H = 2T_0$ .

**Ответ:**  $T_H = 2T_0, T_2 = 4T_0$ .

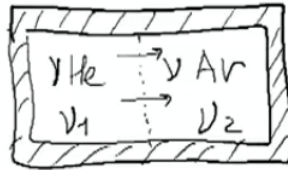




## Задача 2

Теплоизолированный горизонтальный сосуд разделен пористой перегородкой на две равные части. В начальный момент в левой части сосуда находится  $\nu = 2$  моль гелия, а в правой — такое же количество моль аргона. Атомы гелия могут проникать через перегородку, а для атомов аргона перегородка непроницаема. Температура гелия равна температуре аргона:  $T = 300$  К. Определите отношение внутренних энергий газов по разные стороны перегородки после установления термодинамического равновесия.

### Решение



Прокомментируем официальное решение. Так как гелий может переходить через перегородку, а аргон нет, то при термодинамическом равновесии  $\nu_1 = 1$ ,  $\nu_2 = 3$ . Внутренняя энергия  $U_1 = \frac{3}{2}\nu_1 RT_1$  и  $U_2 = \frac{3}{2}\nu_2 RT_2$ , где индекс 1 соответствует гелию после установления термодинамического равновесия, а 2 — аргону. Поскольку сосуд теплоизолирован, то при равновесии  $T_1 = T_2$ . Значит мы можем записать отношение

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{1}{3}$$

**Ответ:**  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{1}{3}$ .



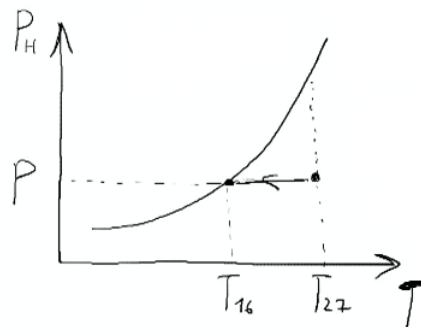
### Задача 3

В эксперименте установлено, что при температуре воздуха в комнате  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  на стенке стакана с холодной водой начинается конденсация паров воды из воздуха, если снизить температуру стакана до  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По результатам этих экспериментов определите относительную влажность воздуха. Для решения задачи воспользуйтесь таблицей. Изменится ли относительная влажность при повышении температуры воздуха в комнате, если конденсация паров воды из воздуха будет начинаться при той же температуре стакана  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? 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

#### Решение

График зависимости насыщенного пара от температуры в школе вводится эмпирически. Температура воздуха в комнате  $27$  и когда мы вносим стакан температурой  $16$  — это означает, что небольшая прослойка воздуха принимает температура  $16$ . в комнате давление постоянно. И при температуре  $T_{16}$  давление пара становится равным давлению насыщенного пара  $P_{\text{нас } 16} = 18 \text{ гПа}$ . Поскольку концентрация не меняется, то давление сохраняется постоянным и при  $T_{27}$  давление тоже будет  $18 \text{ гПа}$ , но это уже не давление насыщенного пара. А давление насыщенного пара при  $27$  будет равно  $P_{\text{нас } 27} = 36 \text{ гПа}$ .



Осталось применить формулу для относительной влажности:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{нас}}} = \frac{18}{36} = 0,5.$$

Относительная влажность при повышении температуры в комнате, если конденсация паров воды из воздуха будет начинаться при той же температуре стакана **изменится**. Так как с увеличением температуры  $P_{\text{нас}}$  растет (см. рисунок), а относительная влажность зависит от него обратно пропорционально,  $P = \text{const}$ ? поскольку температура осталась  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Значит относительная влажность будет уменьшаться с ростом температуры комнаты.

**Ответ:**  $\eta = 50\%$ .

### Задача 4

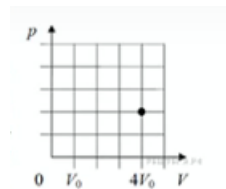
Летом в ясную погоду над полями и лесами к середине дня часто образуются кучевые облака, нижняя кромка которых находится на одинаковой высоте. Объясните опираясь на известные вам законы и закономерности, физические процессы, которые приводят к этому.

#### Решение

У поверхности земли температура выше чем на уровне нижней кромки кучевых облаков. Водяной пар нагреваясь у поверхности Земли начинает подниматься, и на определенной высоте, там где температура достигает температуры конденсации, он конденсирует. Поэтому на этой высоте происходит образование нижней кромки кучевых облаков.

### Задача 5

В стеклянном цилиндре под поршнем при комнатной температуре  $t_0$  находится только водяной пар. Первоначальное состояние системы показано точкой на  $PV$  - диаграмме. Медленно перемещая поршень, объем  $V$  достигает значения  $2V_0$ , на внутренней стороне стенок цилиндра выпадает роса. Постройте график зависимости давления  $P$  в цилиндре от объема  $V$  на отрезке от  $V_0$  до  $4V_0$ . Укажите, какими закономерностями Вы при этом воспользовались.

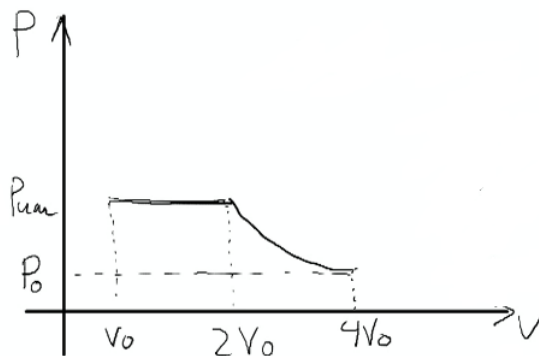


#### Решение

Раз на внутренней стороне цилиндра появилась роса, значит началась конденсация и давления пара становится равны давлению насыщенного пара. При дальнейшем уменьшении объема давление насыщенного пара не меняется, так как меняется его количество (пар конденсируется — увеличивается количество жидкости). По условию от  $4V_0$  до  $2V_0$  идет изотерма. Далее давление не меняется и равно давлению насыщенного пара. Считаем пар идеальным газом. Найдем  $P_{\text{нас}}$ . На изотерме  $t = t_0 = \text{const}$ . Изначально у нас есть какое-то давление и из уравнения Менделеева-Клапейрона мы найдем  $P_{\text{нас}}$ .

$$P_0 4V_0 = \nu RT_0 \quad P_{\text{нас}} 2V_0 = \nu RT_0$$

Поделив одно на другое выражаем искомое:  $P_{\text{нас}} = 2P_0$



**Ответ:**  $P_{\text{нас}} = 2P_0$ .

## Задача 6

Две порции одного и того же идеального газа изотермически расширяются при одной и той же температуре. Изотермы представлены на рисунке. Почему изотерма I лежит выше изотермы II? Ответ поясните, указав, какие физические закономерности Вы использовали для объяснения.



### Решение

Вспомним что такое изотерма. Из уравнения Менделеева–Клапейрона  $PV = \nu RT$  при постоянной температуре и постоянном количестве вещества получаем

$$P = \frac{\text{const}}{V} = \frac{\nu RT}{V}.$$

Посмотрев на это уравнение сразу становится понятно что при одинаковой температуре и одинаковом объеме изотермы отличаются из-за разного количества вещества  $\nu$ . Значит  $\nu_1 > \nu_2$  и для одного и того же газа  $\nu_1 = \frac{m_1}{\mu} > \nu_2 = \frac{m_2}{\mu}$ , следовательно  $m_1 > m_2$ .

**Ответ:**  $m_1 > m_2$ .

## Задача 7

В какое время года — зимнее или летнее — оставленные дома на столе куски хлеба быстрее зачерствеют, а в какое дольше останутся мягкими, но при этом заплесневеют? ответ поясните, указав, какие физические явления и законы Вы использовали для объяснения.

### Решение

Зимой дома работают батареи и поэтому относительная влажность обычно зимой низкая, потому что воздух на улице охлаждается, происходит конденсация паров, лишняя влага из этого воздуха уходит и в вашей комнате он нагревается. Поэтому относительная влажность маленькая (примерно 30%). Поэтому зимой хлеб зачерствеет. Летом же температура за окном повышается, повышается относительная влажность. Значит влажность в вашей комнате тоже повышается и хлеб заплесневеет.



## Задача 8

С одним молем гелия провели процесс, при котором среднеквадратичная скорость атомов гелия выросла в  $n = 2$  раза. В ходе этого процесса средняя кинетическая энергия атомов гелия была пропорциональна объему, занимаемому гелием. Какую работу совершил газ в этом процессе? Считать гелий идеальным газом, а значение среднеквадратичной скорости атомов гелия в начале процесса принять равным  $v = 100$  м/с.

### Решение

Мы знаем, что средняя кинетическая энергия  $\langle \varepsilon_{\text{кин}} \rangle = \frac{3}{2}kT = \frac{m\langle v^2 \rangle}{2}$ . Отсюда выразим температуру.

$$T = \frac{m \langle v^2 \rangle}{3k}$$

Так масса молекулы нам не дана, то найдем ее из следующего соотношения  $m = \frac{\mu}{N_A}$  и зная, что  $N_A \cdot k = R$  выражение для температуры примет вид

$$T = \frac{\mu \langle v^2 \rangle}{3R}.$$

В условиях нашей задачи  $T_1 = \frac{\mu \langle v_1^2 \rangle}{3R}$  и  $T_2 = \frac{\mu n^2 \langle v_1^2 \rangle}{3R}$ .

Средняя кинетическая энергия была пропорциональна объему — это значит, что  $\langle \varepsilon_{\text{кин}} \rangle \propto T \propto V$ , а из уравнения Менделеева-Клапейрона  $P = \text{const}$ .

По первому началу термодинамики  $A = \Delta Q - \Delta U$ . Зная, что внутренняя энергия — это сумма энергии каждой частицы  $U = N_A \cdot \langle \varepsilon_{\text{кин}} \rangle$ . Соответственно

$$\Delta U = N_A \cdot \langle \varepsilon_{\text{кин}_1} \rangle - \langle \varepsilon_{\text{кин}_2} \rangle = N_A \cdot \frac{m \langle v_1^2 \rangle}{2} (n^2 - 1)$$

Для одного моля идеального газа можно записать первое начало термодинамики следующим образом  $\Delta Q = C_V \Delta T + P \Delta V$  ( $C_V$  — теплоемкость при постоянном объеме). Из уравнения Менделеева-Клапейрона найдем давление и подставим в формулу для первого начала термодинамики выше ( $P = \frac{R \Delta T}{\Delta V}$ ). Тогда получаем

$$\Delta Q_{P=\text{const}} = \Delta T (C_V + R).$$

Тогда работа

$$A = (C_V + R) \frac{\mu \langle v_1^2 \rangle}{3R} (n^2 - 1) - \frac{\mu \langle v_1^2 \rangle}{2} (n^2 - 1) = \mu \langle v_1^2 \rangle (n^2 - 1) \left( \frac{C_V + R}{3R} - \frac{1}{2} \right).$$

$$A = 4 \cdot 10^{-3} (4 - 1) \left( \frac{\frac{3}{2}R + R}{3R} - \frac{1}{2} \right) = 40 \text{ Дж}$$

<b>Ответ:</b> $A = \mu \langle v_1^2 \rangle (n^2 - 1) \left( \frac{C_V + R}{3R} - \frac{1}{2} \right) = 40 \text{ Дж}.$
--

## Задача 9

Задача с сайта Решу ЕГЭ №2976.

С разреженным азотом, который находится в сосуде под поршнем, провели два опыта. В первом опыте газу сообщили, закрепив поршень, количество теплоты  $Q_1 = 742$  Дж, в результате чего его температура изменилась на некоторую величину  $\Delta T$ . Во втором опыте, предоставив азоту возможность изобарно расширяться, сообщили ему количество теплоты  $Q_2 = 1039$  Дж, в результате чего его температура изменилась также на  $\Delta T$ . Каким было изменение температуры в опытах? Масса азота  $m = 1$  кг.

### Решение

Согласно первому началу термодинамики  $Q_1 = \Delta U$  в первом процессе и  $Q_2 = \Delta U + A$  во втором. Где  $\Delta U$  — приращение внутренней энергии газа (одинаковое в двух опытах). Работа совершалась газом в ходе изобарного расширения  $A = P\Delta V$ . С помощью уравнения Менделеева–Клапейрона эту работу можно выразить через приращение температуры газа:

$$P\Delta V = \frac{m}{M}R\Delta T.$$

Получаем выражение для приращения температуры:

$$\Delta T = \frac{Q_2 - Q_1}{m}M.$$

Второе решение смотрите на сайте Решу ЕГЭ.

**Ответ:**  $\Delta T = \frac{Q_2 - Q_1}{m}M \approx 1$  К.

## Задача 10

Идеальная тепловая машина обменивается теплотой с теплым телом — окружающей средой, находящейся при температуре  $+25^\circ\text{C}$ , и холодным телом с температурой  $-18^\circ\text{C}$ . В некоторый момент машину запустили в обратном направлении, так что все составляющие теплового баланса — работа и количество теплоты — поменяли свои знаки. При этом за счет работы, совершенной двигателем тепловой машины, от холодного тела теплота стала отбираться, а теплому телу — сообщаться. Какую работу совершил двигатель тепловой машины, если количество теплоты, отведенной от холодного тела, равно  $165$  кДж? Ответ округлите до целого числа кДж.

### Решение



В холодильной машине работа совершается над газом, поэтому  $A < 0$ . для холодильника в данном случае можно записать равенство:

$$1 - \frac{T_x}{T_n} = 1 - \frac{Q_x}{Q_n}$$

Значит  $Q_n = \frac{T_n}{T_x} \cdot Q_x$ . Работа записывается для холодильной машины через количества теплот следующим образом:

$$A = Q_n - Q_x = \left(\frac{T_n}{T_x} - 1\right) \cdot Q_x$$

**Ответ:**  $A = 28$  кДж.