

11 класс, Экспресс-подготовка к ЕГЭ по физике

Набор задач для самостоятельного решения по занятиям 4 и 5.

Темы: термодинамика и фазовые переходы (часть 2).

Задача 1 (3 балла) [идеальный газ, тепловая машина, КПД]

Цикл тепловой машины, рабочим телом которой являются $\nu = 3$ моля одноатомного идеального газа, состоит из изотермического расширения, изохорного охлаждения и адиабатического сжатия. В изохорном процессе температура газа понижается на $\Delta T = 40\text{К}$, а при изотермическом расширении газ совершает работу $A \approx 2,5\text{кДж}$. Найдите КПД этого цикла. Ответ укажите в процентах, округлив до целого значения.

Подсказка 1: Если записать уравнение процесса в виде $p = k \cdot V$, то связь температуры с объемом в этом процессе $T = \frac{pV}{R} = \frac{k}{R}V^2$.

Подсказка 2: Уменьшение плотности в n раз при неизменной массе означает увеличение объема во столько же раз: $V_2 = nV_1$.

Подсказка 3: Работа газа равна площади под диаграммой процесса в координатах давление-объем, то есть для данного процесса площади трапеции: $A = \frac{p_2 + p_1}{2}(V_2 - V_1) = \frac{k}{2}(V_2^2 - V_1^2)$.

Решение:

Рабочее тело получает тепло только при изотермическом расширении, в котором $\Delta U = 0$, поэтому теплота нагревателя $Q_H = A$. Рабочее тело отдает тепло только при изохорном охлаждении, в котором $A = 0$, поэтому теплота холодильника $Q_X = \Delta U = \frac{3}{2}\nu R\Delta T$.

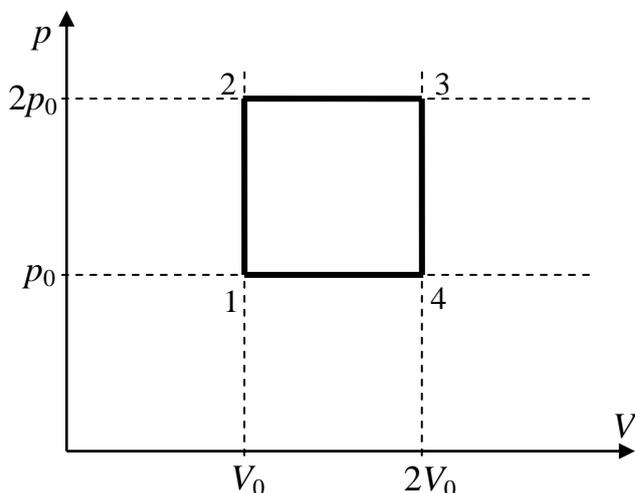
Следовательно, КПД цикла $\eta = 1 - \frac{Q_X}{Q_H} = 1 - \frac{3\nu R\Delta T}{2A} \approx 0,40 = 40\%$. Полезно обратить

внимание, что в этой задаче теплоту холодильника и теплоту нагревателя было вычислить проще, чем работу в цикле!

Ответ: 40.

Задача 2 (4 балла) [идеальный газ, уравнение Менделеева-Клапейрона, первое Начало термодинамики, тепловая машина]

Цикл одноатомного идеального газа, являющегося рабочим телом тепловой машины, состоит из двух изохор и двух изобар (см. рисунок). Найдите КПД этой тепловой машины. Ответ приведите в процентах, округлив до десятых.



Подсказка 1: удобно вычислить работу в цикле: $A = (2p_0 - p_0) \cdot (2V_0 - V_0) = p_0V_0$.

Подсказка 2: рабочее тело получает тепло в изохорном процессе 12 и в изобарном 23.

Подсказка 3: $Q_{12} = \Delta U_{12} = \frac{3}{2} p_0V$, $Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23} = 5p_0V$.

Решение:

В данном случае удобно вычислить работу в цикле: $A = (2p_0 - p_0) \cdot (2V_0 - V_0) = p_0V_0$.

Рабочее тело получает тепло в изохорном процессе 12 и в изобарном 23, поэтому теплота нагревателя $Q_H = Q_{12} + Q_{23}$. При этом, в соответствии с 1-ым Началом термодинамики:

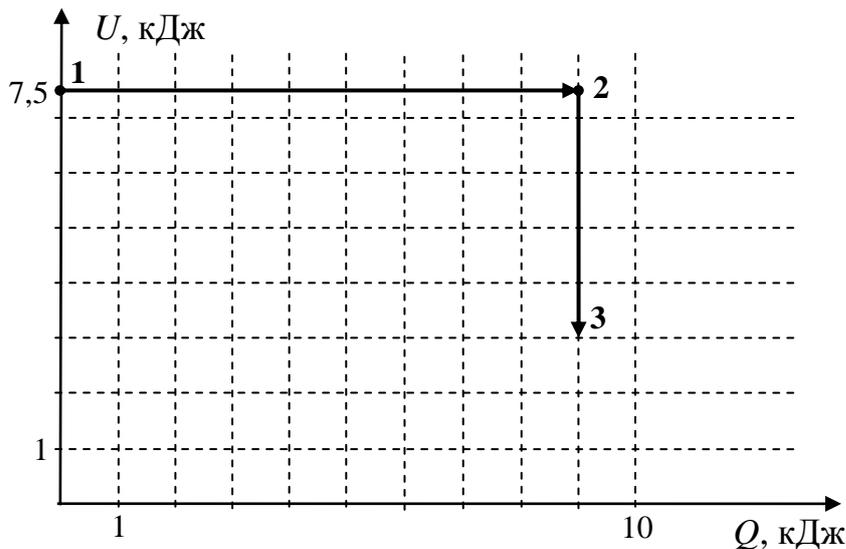
$$\left. \begin{aligned} Q_{12} = \Delta U_{12} &= \frac{3}{2}(2p_0V_0 - p_0V_0) = \frac{3}{2}p_0V_0 \\ Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23} &= \frac{3}{2}(4p_0V_0 - 2p_0V_0) + 2p_0V_0 = 5p_0V \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_H = \frac{13}{2}p_0V_0.$$

По определению КПД цикла $\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{2}{13} \approx 0,154$.

Ответ: 15,4.

Задача 3 (4 балла) [идеальный газ, внутренняя энергия, количество теплоты, работа газа]

В цилиндре с гладкими стенками, закрытом подвижным поршнем, находится идеальный газ. На диаграмме показано изменение внутренней энергии газа U при передаче ему количества теплоты Q в процессе 1-2-3. Найти работу, совершенную газом, в этом процессе. Ответ записать в Джоулях.



Подсказка 1: процесс 1-2 идет при неизменной внутренней энергии, что для идеального газа означает постоянство температуры.

Подсказка 2: процесс 2-3 не сопровождается изменением количества сообщенного газу тепла, то есть это – адиабатный процесс.

Подсказка 3: из диаграммы на основании 1 Начала термодинамики можно найти $A_{12} = Q_{12}$ и $A_{23} = -\Delta U_{23}$.

Решение:

Процесс 1-2 идет при неизменной внутренней энергии, что для идеального газа означает постоянство температуры. При этом газу сообщается положительное количество теплоты. Таким образом, 1-2 – это изотермическое расширение идеального газа. При этом совершается положительная работа, вычисляемая из диаграммы на основании 1 Начала термодинамики: $A_{12} = Q_{12} = 9$ кДж. Процесс 2-3 не сопровождается изменением количества сообщенного газу тепла, то есть это – адиабатный процесс. Поскольку внутренняя энергия (и

вместе с ней температура) газа убывает, то это – адиабатное расширение, при котором опять совершается положительная работа $A_{23} = -\Delta U_{23} = 4,5 \text{ кДж}$. Таким образом, полная работа $A = A_{12} + A_{23} = 13,5 \text{ кДж}$.

Ответ: 13,5.

Задача 4 (4 балла) [влажный воздух, насыщенный пар, относительная влажность]

Под подвижным поршнем в цилиндрическом сосуде с вертикальными стенками находится воздух с относительной влажностью 50%. Когда поршень находится на высоте $h_0 = 30 \text{ см}$ над дном сосуда, давление влажного воздуха равно $p_0 \approx 100 \text{ кПа}$. Как изменяется давление воздуха при опускании поршня, если температура воздуха поддерживается постоянной и равной $t = 100^\circ\text{C}$? В качестве ответа напишите подряд номера ответов для случаев А, Б, В и Г (не разделяя знаками препинания, например: 4132).

ВЫСОТА ПОЛОЖЕНИЯ ПОРШНЯ	ДАВЛЕНИЕ
А) 20 см	1) 300 кПа
Б) 15 см	2) 200 кПа
В) 10 см	3) 150 кПа
	4) 250 кПа

Таблица для ответа:

А	Б	В

Подсказка 1: давление насыщенного водяного пара при $t = 100^\circ\text{C}$ $p_H(t) \approx 100 \text{ кПа}$.

Подсказка 2: давление влажного воздуха есть сумма парциальных давлений газа (сухого воздуха) и водяного пара; например, в начальном состоянии по относительной влажности можно определить, что давление пара $p_0^{(n)} = 0,5 \cdot p_H(t) \approx 50 \text{ кПа}$, и поэтому давление сухого воздуха $p_0^{(c)} \approx 50 \text{ кПа}$.

Подсказка 3: при изотермическом уменьшении объема давление газа растет обратно пропорционально объему, а пара – растет только до начала конденсации.

Решение:

При заданной в условии температуре $t = 100^\circ\text{C}$ давление насыщенного водяного пара $p_H(t) \approx 100 \text{ кПа}$. Давление влажного воздуха есть сумма парциальных давлений газа (сухого воздуха) и водяного пара; например, в начальном состоянии по относительной влажности можно определить, что давление водяного пара $p_0^{(n)} = 0,5 \cdot p_H(t) \approx 50 \text{ кПа}$, и поэтому парциальное давление сухого воздуха $p_0^{(c)} \approx 50 \text{ кПа}$. Далее давление сухого воздуха будет расти обратно пропорционально объему (и, соответственно, высоте поршня над дном

сосуда): $p^{(c)}(h) = p_0^{(c)} \frac{h_0}{h}$. Значит, при заданных в п.А,Б,В значениях высоты парциальные

давления сухого воздуха равны соответственно 75 кПа, 100 кПа и 150 кПа. Парциальные давления водяного пара растут точно так же до начала конденсации, т.е. до $h = 15 \text{ см}$, когда давление пара сравнивается с давлением насыщенного пара при данной температуре. При дальнейшем изотермическом сжатии давление пара остается неизменным за счет конденсации (пока весь пар не сконденсируется), поэтому при $h = 10 \text{ см}$ это давление равно $p_H(t) \approx 100 \text{ кПа}$. Складывая парциальные давления, находим значения давления влажного воздуха: 150 кПа, 200 кПа и 250 кПа.

Ответ: 324.

Задача 5 (4 балла) [плавление, конденсация, уравнение теплового баланса]

В теплоизолированный сосуд, содержащий $m = 50 \text{ г}$ водяного пара под давлением $p = 1 \text{ атм}$, засыпали $M = 200 \text{ г}$ льда с температурой $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Найти температуру содержимого сосуда

после установления равновесия. В начальном состоянии на стенках сосуда находились мелкие капельки росы. Удельная теплоемкость воды $c_B = 4200$ Дж/кг·К, удельная теплота плавления льда $\lambda = 330$ кДж/кг, удельная теплота парообразования воды $r = 2480$ кДж/кг. Ответ записать в градусах шкалы Цельсия, округлив до целых.

Подсказка 1: так как в начальном состоянии на стенках сосуда находились мелкие капельки росы, то пар был насыщенным, и его температура $t_1 = 100^\circ\text{C}$.

Подсказка 2: сумма количеств теплоты процессов, идущих с выделением тепла (конденсация пара и охлаждение образовавшейся из него воды до конечной температуры t): $Q_+ = rm + c_B m(t_1 - t)$.

Подсказка 3: сумма количеств теплоты процессов, идущих с поглощением тепла (таяние льда и нагревание образовавшейся из него воды): $Q_- = \lambda M + c_B M(t - t_0)$.

Решение:

Так как в начальном состоянии на стенках сосуда находились мелкие капельки росы, то пар был насыщенным, и его температура $t_1 = 100^\circ\text{C}$. Предположим, что в процессе установления равновесия весь лед растаял и весь пар сконденсировался. Тогда сумма количеств теплоты процессов, идущих с выделением тепла (конденсация пара и охлаждение образовавшейся из него воды до конечной температуры t): $Q_+ = rm + c_B m(t_1 - t)$. Сумма количеств теплоты процессов, идущих с поглощением тепла (таяние льда и нагревание образовавшейся из него воды): $Q_- = \lambda M + c_B M(t - t_0)$. Из уравнения теплового баланса

$$\begin{aligned} Q_+ = Q_- &\Rightarrow rm + c_B m(t_1 - t) = \lambda M + c_B M(t - t_0) \Rightarrow \\ &\Rightarrow t = \frac{rm - \lambda M + c_B(mt_1 + Mt_0)}{(M + m)c_B} \approx 75^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Отметим, что эта температура оказалась в интервале $t_0 < t < t_1$, что подтверждает сделанное предположение.

Ответ: 75.

Задача 6 (4 балла) [влажный воздух, давление насыщенных паров, относительная влажность]

Плотность влажного воздуха при температуре $t = 50^\circ\text{C}$ и давлении $p = 99.52$ кПа равна $\rho \approx 1.05$ кг/м³. Давление насыщенных паров воды при этой температуре $p_{\text{нас}} \approx 12.31$ кПа. Найти относительную влажность воздуха. Молярную массу сухого воздуха считать равной $\mu_1 \approx 29$ г/моль, молярная масса воды $\mu_2 = 18$ г/моль. Ответ выразить в процентах.

Подсказка 1: давление влажного воздуха есть сумма давлений паров воды (которое вычисляется через относительную влажность) и сухого воздуха.

Подсказка 2: то же самое можно сказать и о плотности влажного воздуха.

Подсказка 3: плотность каждой из компонент связана с давлением благодаря уравнению состояния.

Решение:

Давление влажного воздуха есть сумма давлений паров воды (p_1) и сухого воздуха (p_2):

$$p = p_1 + p_2 = r \cdot p_{\text{нас}} + p_2$$

(здесь использовано определение относительной влажности). То же самое можно сказать и о плотности влажного воздуха:

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 = \frac{\mu_1 p_1 + \mu_2 p_2}{RT} = \frac{\mu_1 r p_{\text{нас}} + \mu_2 p_2}{RT} \Rightarrow \rho RT = \mu_1 r p_{\text{нас}} + \mu_2 p_2.$$

Выражая из первого уравнения $p_2 = p - r p_{\text{нас}}$ и подставляя его во второе, находим относительную влажность

$$r = \frac{\mu_2 p - \rho RT}{(\mu_2 - \mu_1) p_{\text{нас}}} \approx 0.5.$$

Ответ: 50.

Задача 7 (3 балла) [влажный воздух, давление насыщенных паров, относительная влажность]

В герметичном сосуде с вертикальными стенками под подвижным поршнем находится 20 г жидкой воды и 40 г водяного пара в равновесии. Поршень медленно поднимают, сохраняя температуру содержимого сосуда неизменной. Во сколько раз увеличится объем сосуда к тому моменту, когда относительная влажность пара в сосуде станет равна 50%? Ответ дайте в виде целого числа. Считайте, что при температуре сосуда плотность жидкой воды намного больше плотности насыщенного водяного пара.

Подсказка 1: Пока в сосуде присутствует жидкая вода, водяной пар остается насыщенным, и при неизменной температуре его плотность тоже остается неизменной.

Подсказка 2: Согласно условию, объемом жидкой воды в начальном состоянии можно пренебречь, и поэтому к моменту окончания испарения объем сосуда увеличился примерно в $\frac{(40+20)г}{40г} = 1,5$ раза.

Подсказка 3: При дальнейшем увеличении объема сосуда давление насыщенного пара не изменяется (так как температура по-прежнему неизменна), а давление пара падает обратно пропорционально объему.

Решение:

Пока в сосуде присутствует жидкая вода, водяной пар остается насыщенным, и при неизменной температуре его плотность тоже остается неизменной. К моменту, когда вся вода испарится, масса водяного пара увеличится в $\frac{(40+20)г}{40г} = 1,5$ раза. Согласно условию,

объемом жидкой воды в начальном состоянии можно пренебречь, и поэтому к моменту окончания испарения объем сосуда увеличился примерно в 1,5 раза, а относительная влажность пара равна 100%. При дальнейшем увеличении объема сосуда давление насыщенного пара не изменяется (так как температура по-прежнему неизменна), а давление пара падает обратно пропорционально объему. Поэтому относительная влажность, равная

$r = \frac{P}{P_{нас}(T)}$, тоже уменьшается обратно пропорционально объему. Значит, для понижения

относительной влажности в два раза нужно увеличить объем сосуда еще в два раза. Таким образом, за весь процесс объем сосуда увеличится в $1,5 \times 2 = 3$ раза.

Ответ: 3.

Задача 8 (3 балла) [плавление, уравнение теплового баланса]

В теплоизолирующем сосуде лежит кусок льда с температурой $t_1 = 0^\circ C$ при нормальном давлении. Если сообщить ему некоторое количество тепла (Q), то температура содержимого сосуда станет равна $t_2 \approx 18,9^\circ C$. Какая часть льда k растает, если в том же начальном состоянии сообщить ему в два раза меньшее количество теплоты ($Q/2$)? Ответ записать в процентах, округлив до целого значения. Удельная теплоемкость воды $c_B = 4200$ Дж/кг·К, удельная теплота плавления льда $\lambda = 330$ кДж/кг.

Подсказка 1: Поскольку в первом случае температура поднимается выше $t_1 = 0^\circ C$, то весь лед при этом растает.

Подсказка 2: Уравнение теплового баланса для первого процесса имеет вид $Q = \lambda m + c_B m(t_2 - t_1) = m[\lambda + c_B(t_2 - t_1)]$, где m – начальная масса льда.

Подсказка 3: Отметим, что $c_B(t_2 - t_1) \approx 79,38$ кДж/кг меньше $\lambda = 330$ кДж/кг, так что на таяние льда идет больше тепла, чем на нагрев воды, то есть во втором случае не весь лед растает.

Решение:

Поскольку в первом случае температура поднимается выше $t_1 = 0^\circ\text{C}$, то весь лед при этом растает. Обозначим m начальную массу куска льда. Тогда уравнение теплового баланса для первого процесса означает, что $Q = \lambda m + c_B m(t_2 - t_1) = m[\lambda + c_B(t_2 - t_1)]$. Отметим, что $c_B(t_2 - t_1) \approx 79,38$ кДж/кг меньше $\lambda = 330$ кДж/кг, так что на таяние льда идет больше тепла, чем на нагрев воды. Поэтому очевидно, что во втором случае не весь лед растает ($k < 100\%$).

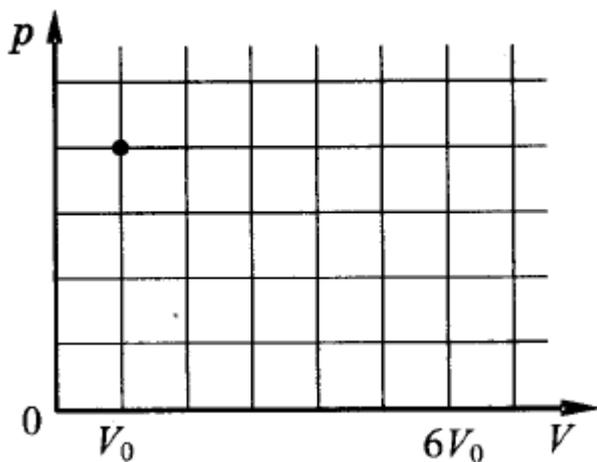
Теперь уравнение теплового баланса $\frac{Q}{2} = \lambda k m \Rightarrow k = \frac{Q}{2\lambda m}$. Подставляя в это выражение Q ,

получим, что $k = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{c_B(t_2 - t_1)}{\lambda} \right] \approx 62\%$.

Ответ: 62.

Задача 9 (4 балла) [влажный воздух, давление насыщенных паров, относительная влажность]

В цилиндре под поршнем в объеме V_0 и комнатной температуре долгое время находятся вода и ее пар. Масса жидкой воды в два раза больше массы пара. На диаграмме давление-объем точкой показано начальное состояние пара (см. рисунок). Медленно перемещая поршень, объем пара изотермически увеличивают до $6V_0$. Постройте диаграмму процесса и с ее помощью выберите два правильных утверждения из приведенных ниже. В качестве ответа укажите номера правильных утверждений подряд, не разделяя их пробелами или знаками препинания (например: 13).



- 1) Диаграмма данного изотермического процесса – гипербола.
- 2) Начальный участок диаграммы от V_0 до $3V_0$ – прямая, параллельная оси объемов.
- 3) Начальный участок диаграммы от V_0 до $2V_0$ – прямая, параллельная оси объемов.
- 4) Участок диаграммы от $2V_0$ до $6V_0$ – гипербола.
- 5) Относительная влажность при $V = 6V_0$ равна 50%.
- 6) В процессе расширения испаряется $5/6$ от начальной массы жидкой воды.

Подсказка 1: Из условия ясно, что в начальном состоянии пар находится в равновесии с жидкостью, то есть является насыщенным..

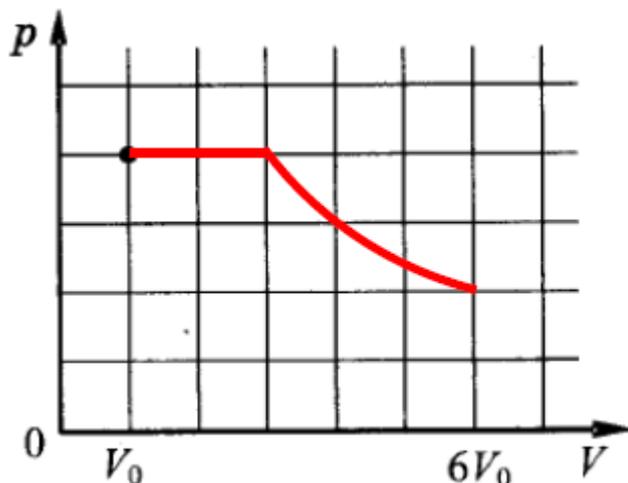
Подсказка 2: При увеличении объема, поскольку температура остается постоянной, то постоянными остаются давление и плотность насыщенного пара, а жидкая вода испаряется.

Подсказка 3: К моменту испарения всей воды масса пара увеличивается в три раза по сравнению с начальным состоянием, и при этом объем пара тоже увеличивается в три раза.

Решение:

Из условия ясно, что в начальном состоянии пар находится в равновесии с жидкостью, то есть является насыщенным. При увеличении объема, поскольку температура остается

постоянной, то постоянными остаются давление и плотность насыщенного пара. При этом жидкая вода испаряется. К моменту испарения всей воды масса пара увеличивается в три раза по сравнению с начальным состоянием, и при этом (так как плотность постоянна) объем пара тоже увеличивается в три раза. Следовательно, давление пара будет оставаться постоянным на участке изменения объема от V_0 до $3V_0$ (утверждение 2 – верное!). Далее жидкой воды под поршнем нет, и давление изотермически расширяющегося ненасыщенного пара убывает обратно пропорционально объему. Значит, к моменту достижения объема $V = 6V_0$ давление убывает в два раза по сравнению с давлением насыщенного пара. Поэтому относительная влажность при этом объеме равна 50% (верно утверждение 5!). Построив график процесса, убеждаемся, что остальные утверждения неверны:

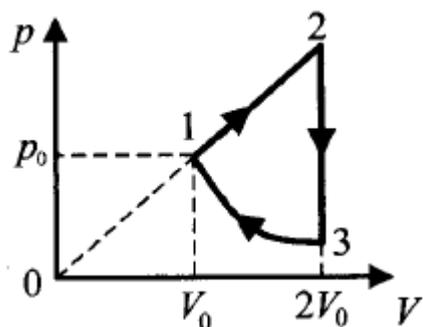


Примечание: это тоже задача, которая в базе заданий ЕГЭ-2018 является «качественной задачей с развернутым ответом», в которой требуется построить график и объяснить его поведение, и к данному виду она приведена для использования в тесте.

Ответ: 25.

Задача 10 (5 баллов) [идеальный газ, тепловая машина, теплота холодильника]

Рабочим телом тепловой машины является постоянное количество одноатомного идеального газа. Цикл рабочего тела показан на рисунке. В процессе 1-2 рабочее тело совершает работу $A_{12} \approx 2500$ Дж. На адиабате 3-1 внешние силы совершают над газом работу $|A_{31}| \approx 925$ Дж. Найти теплоту Q_X , отдаваемую газом за цикл холодильнику. Ответ запишите в Джоулях, округлив до целого значения.



Подсказка 1: Газ отдает тепло холодильнику только в процессе 2-3, то есть $Q_X = |Q_{23}|$.

Подсказка 2: Поскольку этот процесс – изохорный, то количество теплоты для него равно изменению внутренней энергии: $Q_{23} = U_3 - U_2 \Rightarrow Q_X = U_2 - U_3$.

Подсказка 3: В процессе 1-2 работа равна площади под диаграммой процесса

$$A_{12} = \frac{p_0 + 2p_0}{2} V_0 = \frac{3}{2} p_0 V_0.$$

Решение:

Газ отдает тепло холодильнику только в процессе 2-3, то есть $Q_X = |Q_{23}|$. Поскольку этот процесс – изохорный, то количество теплоты для него равно изменению внутренней энергии: $Q_{23} = U_3 - U_2 \Rightarrow Q_X = U_2 - U_3$. Можно преобразовать это выражение к виду $Q_X = U_2 - U_1 + U_1 - U_3$. Так как 3-1 – адиабата, то $A_{31} + U_1 - U_3 = 0 \Rightarrow U_1 - U_3 = |A_{31}|$. В процессе 1-2 работа равна площади под диаграммой процесса $A_{12} = \frac{p_0 + 2p_0}{2} V_0 = \frac{3}{2} p_0 V_0$, а изменение внутренней энергии $U_2 - U_1 = \frac{3}{2} 2p_0 2V_0 - \frac{3}{2} p_0 V_0 = \frac{9}{2} p_0 V_0 = 3A_{12}$. Итак, $Q_X = 3A_{12} + |A_{31}| \approx 8425 \text{ Дж}$.

Ответ: 8425.