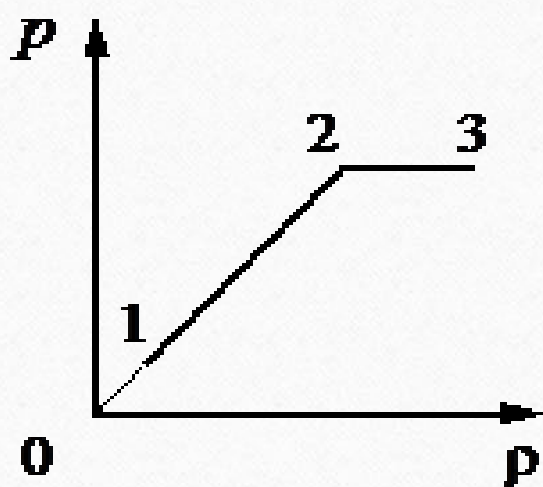


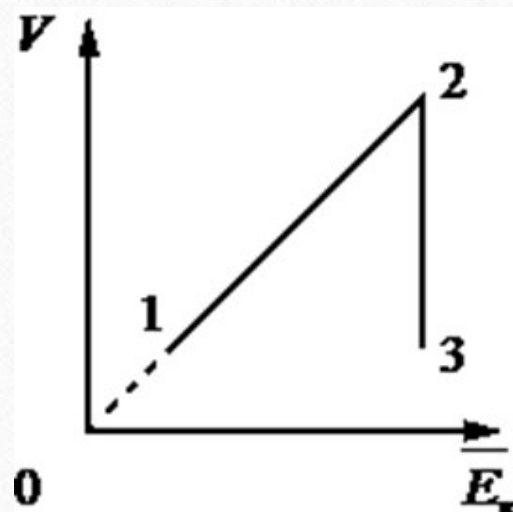
Задание 21 КИМ ЕГЭ по физике «Молекулярная физика и термодинамика» 2025 год.

Презентацию подготовила Рудоман Н. Р.,
Старший преподаватель кафедры
оптоэлектроники КубГУ 2025г
Краснодарский край г. Краснодар

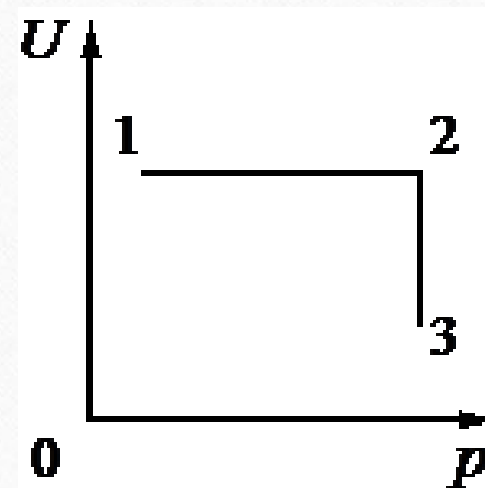
Графические задачи



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



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



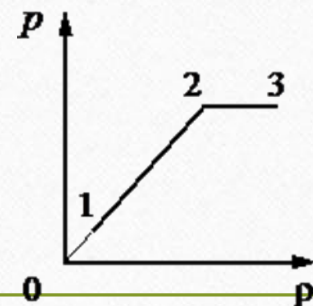
$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

Работа с изопроцессами

Название процесса	Объем	температура	давление
Изобарное нагревание	Увеличивается	Увеличивается	Не измен
Изобарное охлаждение	Уменьшается	Уменьшается	Не измен
Изотермическое расширение	Увеличивается	Не измен	Уменьшается
Изотермическое сжатие	Уменьшается	Не измен	Увеличивается
Изохорное нагревание	Не измен	Увеличивается	Увеличивается
Изохорное охлаждение	Не измен	Уменьшается	Уменьшается

Пример 1

На графике представлена зависимость давления неизменной массы идеального газа от его плотности. Опишите, как изменяются в зависимости от плотности температура и объём газа в процессах 1–2 и 2–3.



Пример 2. На графике представлена зависимость объёма постоянного количества молей одноатомного идеального газа от средней кинетической энергии теплового движения молекул газа. Опишите, как изменяются температура и давление газа в процессах 1–2 и 2–3. Укажите, какие закономерности Вы использовали для объяснения.

Средняя кинетическая энергия теплового движения газа равна:

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT,$$

где T – температура газа.
Отсюда:

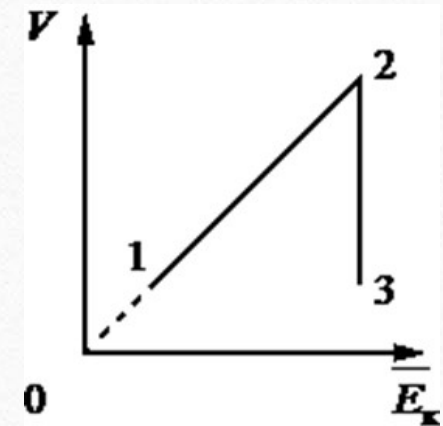
$$T = \frac{2\overline{E_k}}{3k}. \quad (1)$$

Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \nu RT,$$

где p – давление, ν – количество вещества.
Тогда давление можно найти по формуле:

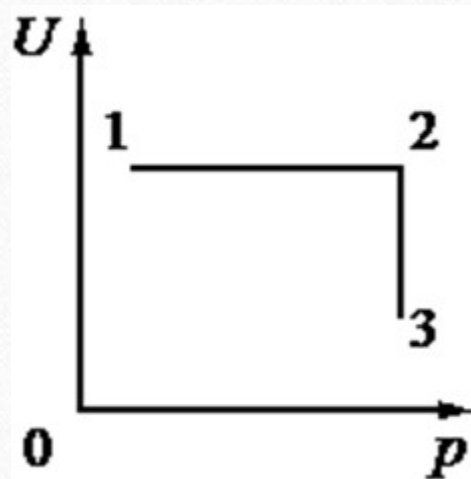
$$p = \frac{\nu RT}{V} = \frac{\nu R \cdot 2\overline{E_k}}{3kV}. \quad (2)$$



Проанализируем процессы:

- **1-2. Средняя кинетическая энергия теплового движения и объём изменяются прямо пропорционально, при этом увеличиваются, значит, по формуле (1) температура газа увеличивается, а по формуле (2) давление не изменяется.**
- **2-3. Средняя кинетическая энергия не изменяется, а объём уменьшается, значит, по формуле (1) температура не изменяется, а по формуле (2) давление увеличивается.**

Пример 3. Постоянное количество одноатомного идеального газа участвует в процессе, который изображён на рисунке в переменных p — U , где U — внутренняя энергия газа, p — его давление. Опираясь на законы молекулярной физики и термодинамики, определите, получает газ теплоту или отдаёт в процессах 1—2 и 2—3.

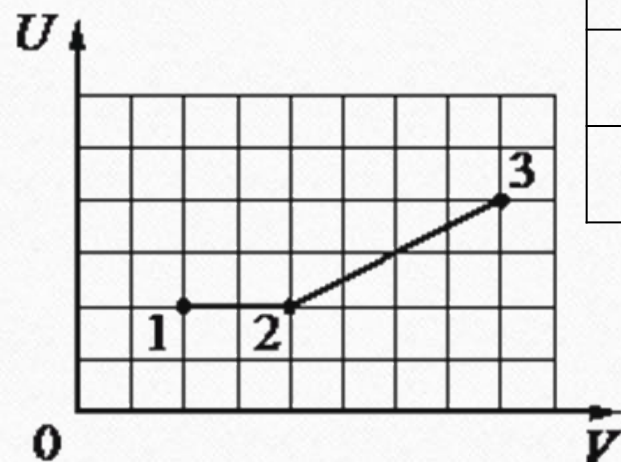


Участки			Тепловой процесс
1-2	Вн эн НЕ ИЗМЕН, температура не изменяется, давление увелич $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$	Масса не изм, значит Объём уменьшается	Изотермическое сжатие $P_1 V_1 = P_2 V_2$
2-3	Давление не измен, внутр энергия уменьш, температура уменьш	Масса на измен, значит объём уменьш	изобарное сжатие $\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$

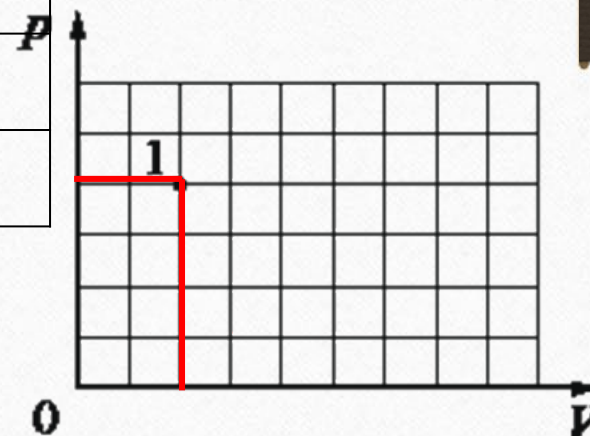
1 закон термодинамики $Q = \Delta U + A_r$								
Название процесса	давление	объем	температура	Работа газа	Работа внешних сил	Изменение внутренней энергии	Колич. теплоты	1 закон термодинамики
Изохорное нагревание	$p \uparrow$	$V = \text{const}$	$T \uparrow$	$A_r = 0$	$A = 0$	$\Delta U > 0$	$Q > 0$	$Q = \Delta U$
Изохорное охлаждение	$p \downarrow$	$V = \text{const}$	$T \downarrow$	$A_r = 0$	$A = 0$	$\Delta U < 0$	$Q < 0$	$Q = \Delta U$
Изотермич сжатие	$p \uparrow$	$V \downarrow$	$T = \text{const}$	$A_r < 0$	$A > 0$	$\Delta U = 0$	$Q < 0$	$Q = A_r$
Изотермич расширение	$p \downarrow$	$V \uparrow$	$T = \text{const}$	$A_r > 0$	$A < 0$	$\Delta U = 0$	$Q > 0$	$Q = A_r$
Изобарное нагревание	$p = \text{const}$	$V \uparrow$	$T \uparrow$	$A_r > 0$	$A < 0$	$\Delta U > 0$	$Q > 0$	$Q = \Delta U + A_r$
Изобарное охлаждение	$p = \text{const}$	$V \downarrow$	$T \downarrow$	$A_r < 0$	$A > 0$	$\Delta U < 0$	$Q < 0$	$Q = \Delta U + A_r$
Адиабатное сжатие	$p \uparrow$	$V \downarrow$	$T \uparrow$	$A_r < 0$	$A > 0$	$\Delta U > 0$	$Q = 0$	$\Delta U = -A_r$
Адиабатное расширение	$p \downarrow$	$V \uparrow$	$T \downarrow$	$A_r > 0$	$A < 0$	$\Delta U < 0$	$Q = 0$	$\Delta U = -A$

-
- **Ответ :**
 - **На участке 1-2 при изотермическом сжатии газ отдает теплоту за счет совершения над ним работы $Q_{1-2} = A_{1-2}$**
 - **На участке 2-3 при изобарном охлаждении газ отдает теплоту за счет уменьшения его внутренней энергии и совершении над газом работы внешними силами $Q_{2-3} = \Delta U_{2-3} + A_{2-3}$**

Пример 4. На рис. 1 приведена зависимость внутренней энергии U 1 моль идеального одноатомного газа от его объёма V в процессе 1—2—3. Постройте график этого процесса в переменных p — V (p —давление газа). Точка, соответствующая состоянию 1, уже отмечена на рис. 2. Построение объясните, опираясь на законы молекулярной физики

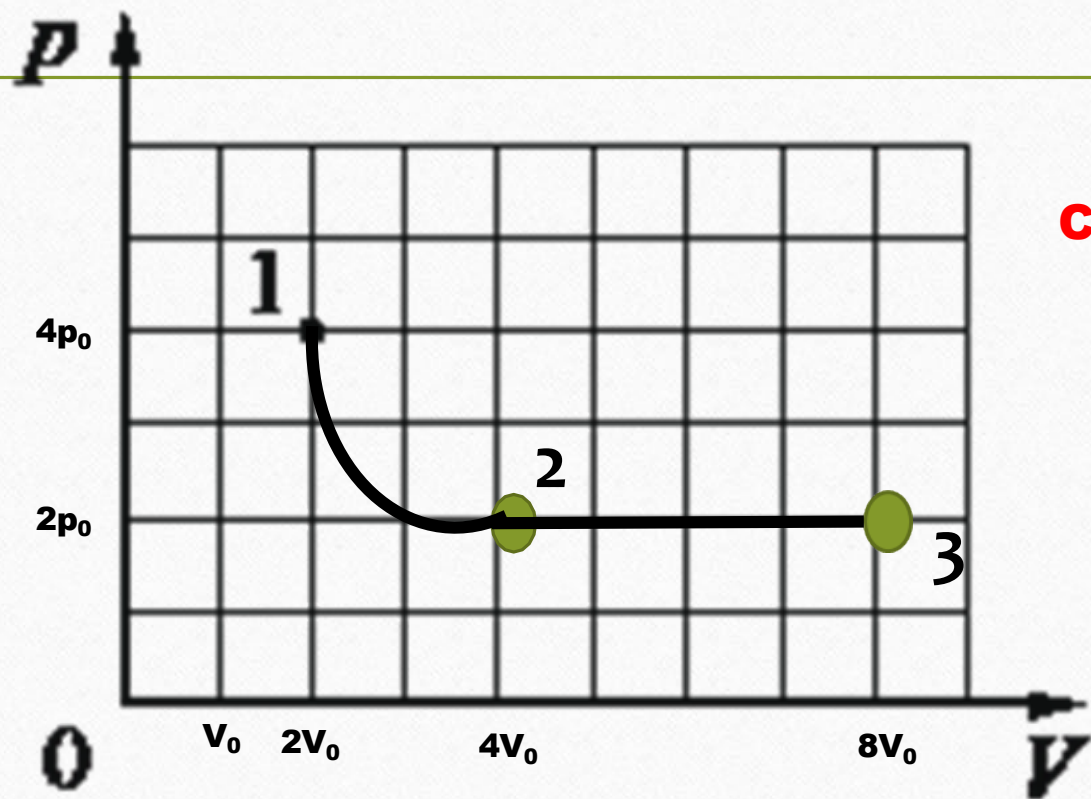


точки	объём	давление	Внутр энергия
1.	$2V_0$	$4p_0$	$2U_0$
2.	$4V_0$?	$2U_0$
3.	$8V_0$?	$4U_0$



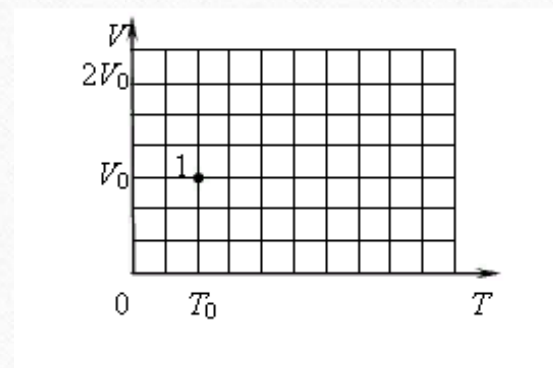
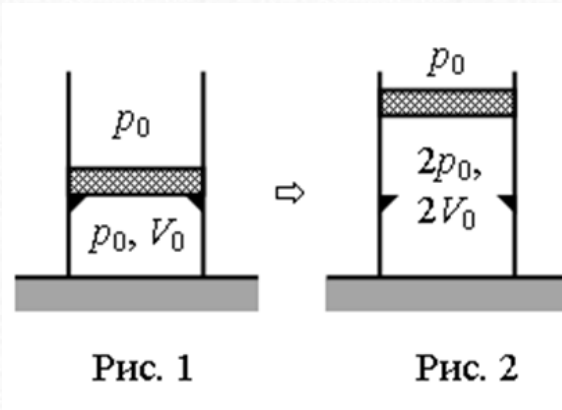
процессы			Тепловой процесс	График p,V
1-2	<p>Вн эн не измен</p> $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$	Масса не изм, значит и темп не изменяется	<p>Изотермический</p> $P_1 V_1 = P_2 V_2$ <p>Объём ув в 2 раза, значит давление ум в 2 раза</p>	Гипербола
2-3	Вн энергия ув в 2 раза, значит температура ув в 2раза, объём ув в 2раза	Масса на измен, значит давление не изменяется	изобарный	Прямая

точки	объём	давление	Внутр энергия
1.	$2V_0$	$4p_0$	$2U_0$
2.	$4V_0$	$2p_0$	$2U_0$
3.	$8V_0$	$2 p_0$	$4U_0$



Соблюдаем масштаб

Пример 5. В вертикальном цилиндре с гладкими стенками под массивным металлическим поршнем находится идеальный газ. В первоначальном состоянии 1 поршень опирается на жёсткие выступы на внутренней стороне стенок цилиндра (рис. 1), а газ занимает объём 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 объём равен $2V_0$ (рис. 2). Количество вещества газа при этом не меняется. Постройте график зависимости объёма газа от его температуры при переходе из состояния 1 в состояние 2. Ответ поясните, указав, какие явления и закономерности Вы использовали для объяснения.



Решение.

1. Определим температуру T_2 конечного состояния газа. Запишем уравнение Клапейрона — Менделеева для газа в состояниях 1 и 2:

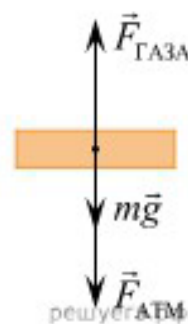
$$\begin{cases} p_0 V_0 = \nu R T_0, \\ 2p_0 \cdot 2V_0 = \nu R T_2, \end{cases}$$

откуда $T_2 = 4T_0$.

2. Покажем силы, приложенные к поршню, когда он уже не опирается на выступы на стенках цилиндра. Сила тяжести $m\vec{g}$ и сила давления на поршень со стороны атмосферы $\vec{F}_{\text{атм}}$ постоянны. Поскольку поршень перемещается медленно, сумму приложенных к нему сил считаем равной нулю. Отсюда следует, что сила давления на поршень со стороны газа $\vec{F}_{\text{газа}}$ тоже постоянна. Значит, ее модуль $F_{\text{газа}} = pS = \text{const}$ (S — площадь горизонтального сечения поршня) при любом положении поршня выше первоначального. Таким образом, $p = 2p_0 = \text{const}$ при $V_0 < V \leq 2V_0$, процесс нагревания газа изобарный $\left(\frac{V}{T} = \text{const}\right)$. Определим температуру начала этого процесса T_n :

$$\begin{cases} p_0 V_0 = \nu R T_0, \\ 2p_0 \cdot V_0 = \nu R T_n, \end{cases}$$

откуда $T_n = 2T_0$.



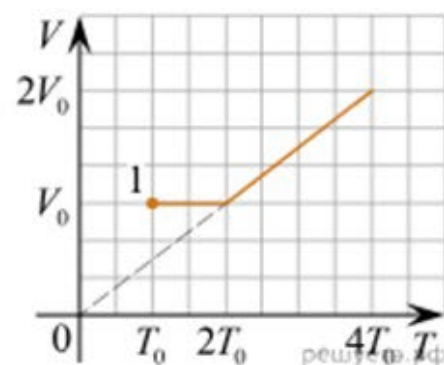
3. На отрезке температур $T_0 \leq T \leq 2T_0$ процесс нагревания газа изохорный ($V = V_0$), давление газа с ростом его температуры при нагревании увеличивается от p_0 до $2p_0$.

4. Ответ:

а) при $T_0 \leq T \leq 2T_0$ $V = V_0 = \text{const}$;

б) при $2T_0 \leq T \leq 4T_0$ объем газа меняется от V_0 до $2V_0$ по закону $\frac{V}{T} = \text{const}$.

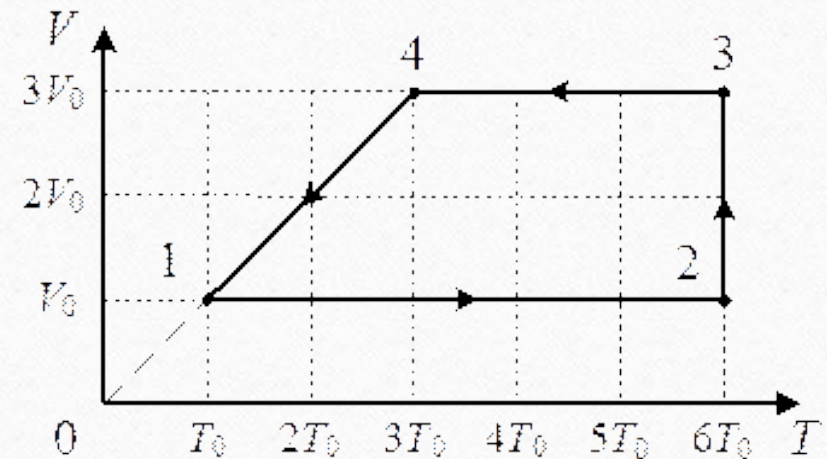
График, изображающий зависимости из пп. а) и б), представляет собой ломаную линию:



Пример 6.

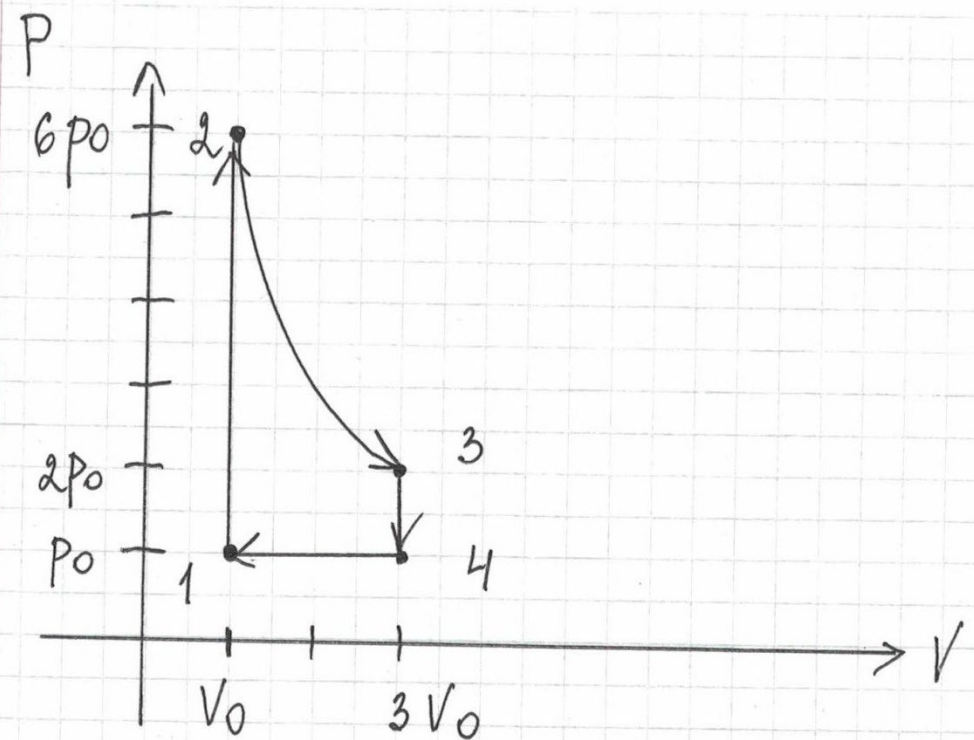
Один моль гелия участвует в циклическом процессе 1–2–3–4–1, график которого изображён на рисунке в координатах V – T , где V – объём газа, T – абсолютная температура. Опираясь на законы молекулярной физики и термодинамики, сравните модуль работы газа в процессе 2–3 и модуль работы внешних сил в процессе 4–1. Постройте график цикла в координатах p – V , где p – давление газа, V – объём газа.

точки	объём	температура	давление
1.	V_0	T_0	p_0
2.	V_0	$6T_0$?
3.	$3V_0$	$6T_0$?
4.	$3V_0$	$3T_0$?



участки			Тепловой процесс	График (p,V)
1-2	ОБЪЁМ НЕ ИЗМЕН, ТЕМП УВ В 6 РАЗ	Масса не изм, значит ДАВЛЕНИЕ УВ В 6 РАЗ	ИЗОХОРНЫЙ	ПРЯМАЯ
2-3	ТЕМПЕРАТУРА НЕ ИЗМЕН, а объём ув в 3 раза $(pV = \nu RT)$	Масса не измен, значит давление умен в 3 раза $P_3 V_3 = P_2 V_2$	ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ	ГИПЕРБОЛА
3-4	ОБЪЁМ НЕ ИЗМЕН, ТЕМП УМЕН В 2 РАЗА $(pV = \nu RT)$	Масса не изм, значит ДАВЛЕНИЕ УМ В 2 РАЗА	изохорный	прямая
4-1	ОБЪЁМ УМ В 3 РАЗА И ТЕМП УМ В 3 РАЗА $(pV = \nu RT)$	Масса не изм, значит ДАВЛЕНИЕ НЕ ИЗМЕНЯЕТСЯ	изобарный	прямая

точки	объём	температура	давление
1.	V_0	T_0	p_0
2.	V_0	$6T_0$	$6p_0$
3.	$3V_0$	$6T_0$	$2p_0$
4.	$3V_0$	$3T_0$	p_0

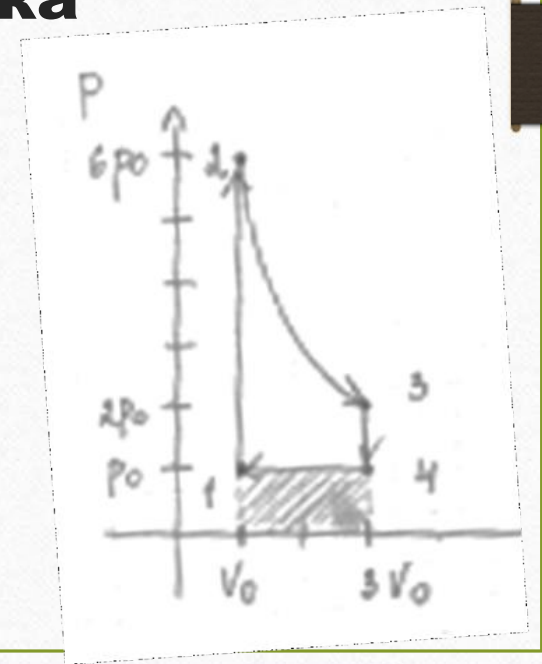


Работа на диаграмме p, V – площадь фигуры построенной под графиком

- На участке 2-3 площадь криволинейной трапеции $A_{2-3} > 4p_0 V_0$
- На участке 4-1 площадь прямоугольника $A_{4-1} = 2p_0 V_0$

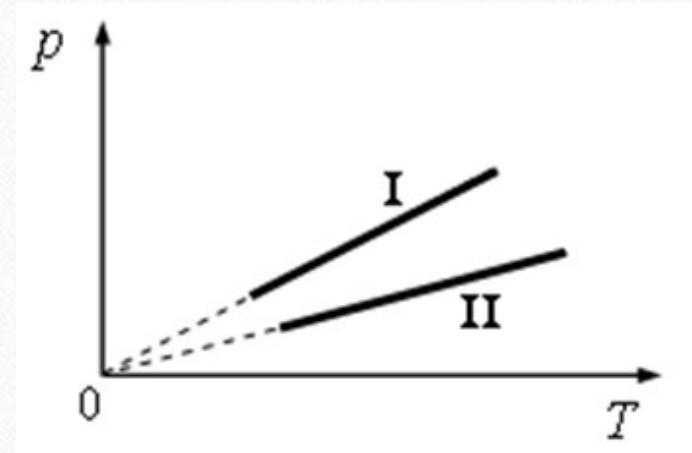


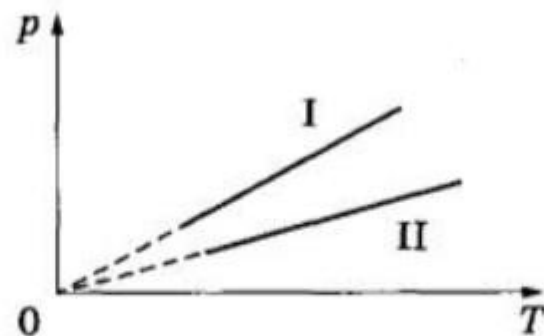
**Ответ: РАБОТА НА
УЧАСТКЕ 1-2 БОЛЬШЕ
МОДУЛЯ РАБОТЫ
ВНЕШНИХ СИЛ НА
УЧАСТКЕ 4-1**



Пример 7.

Две порции одного и того же идеального газа нагреваются в сосудах одинакового объёма. Графики процессов представлены на рисунке. Почему изохора I лежит выше изохоры II? Ответ поясните, указав, какие физические закономерности Вы использовали для объяснения.





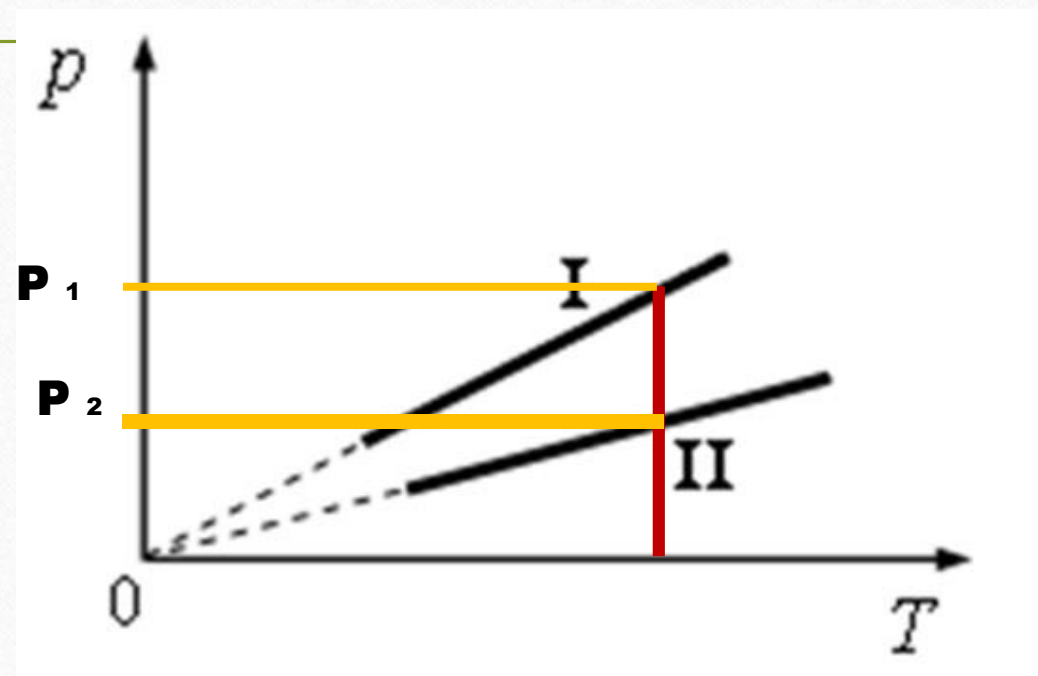
Решение.

1. Количество вещества в первой порции газа больше, чем во второй.

2. Для описания изохорного нагревания идеального газа используем уравнение Менделеева-Клапейрона: $V = \frac{\nu RT}{p}$,

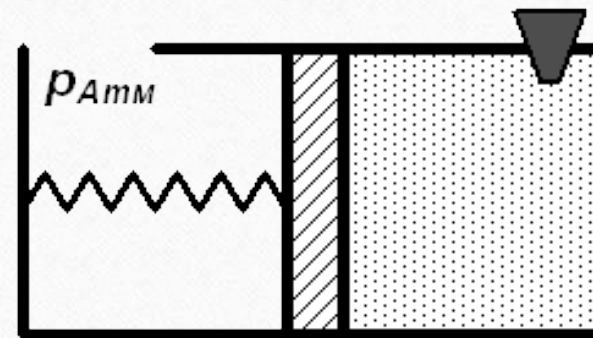
где ν — число молей газа. Отсюда следует, что при одинаковых температуре и объеме $\frac{p_1}{p_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2}$.

3. Как следует из рисунка, $p_1 > p_2$ (при одинаковых температуре и объеме). Поэтому $\nu_1 > \nu_2$.



Пример 8.

Горизонтальный сосуд разделён подвижным поршнем, который может свободно перемещаться без трения. Правая часть сосуда заполнена воздухом и герметично закрыта пробкой, левая часть сосуда открыта. Поршень соединён пружиной с левой стенкой сосуда. Первоначально поршень находится в равновесии, а пружина растянута. Опираясь на законы механики и молекулярной физики, опишите, как будет двигаться поршень, если из правой части сосуда вынуть пробку. Температуру воздуха считать постоянной.



1. Левая часть сосуда открыта, в ней находится атмосферный воздух. Первоначально пружина растянута, сила упругости направлена влево. Поршень находится в равновесии, поэтому равнодействующая сил, действующих на него со стороны газов и пружины, равна нулю: $p_{\text{АТМ}}S - pS - F_{\text{упр}} = 0$, где $p_{\text{АТМ}}$ – атмосферное давление, p – давление газа в правой части сосуда, $F_{\text{упр}}$ – сила упругости, S – площадь поперечного сечения сосуда. Таким образом, давление газа в правой части сосуда меньше атмосферного: $p < p_{\text{АТМ}}$.

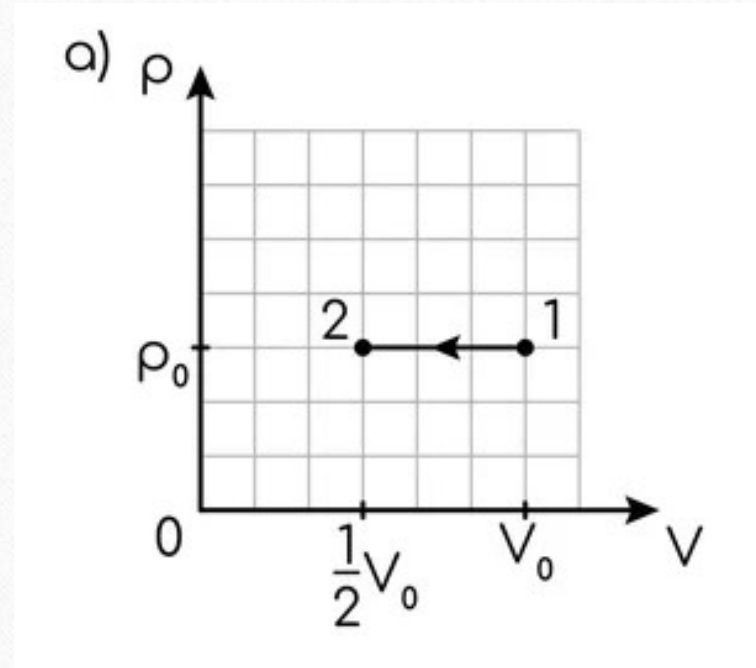
2. Если вынуть пробку, то атмосферный воздух начнёт заполнять правую часть сосуда, и давление в ней возрастёт до атмосферного: $p = p_{\text{АТМ}}$.

3. Равновесие нарушится, и поршень под действием силы упругости начнёт двигаться влево. Поскольку трение между поршнем и сосудом отсутствует, то в дальнейшем поршень будет совершать свободные колебания, которые впоследствии затухнут из-за трения в воздухе.

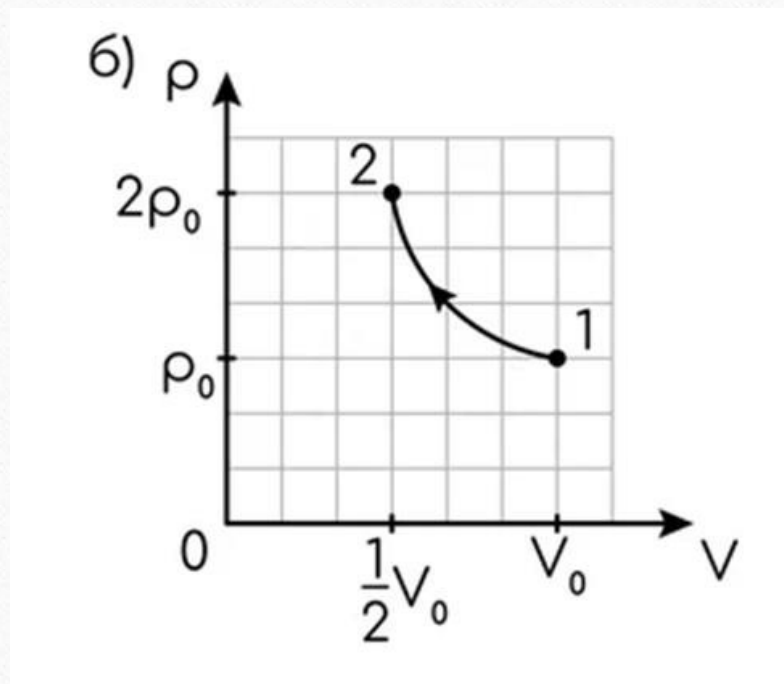
Пример 9.

В одном сосуде под поршнем в объёме V_0 при комнатной температуре находится только насыщенный водяной пар и вода, которая занимает малый объём. В другом сосуде под поршнем в объёме V_0 при том же давлении p_0 находится сухой воздух. Воздух и водяной пар изотермически сжимают так, что объём под поршнем уменьшается в 2 раза. Постройте графики этих двух процессов в переменных p — V . Опираясь на законы молекулярной физики, объясните построение графиков.

При изотермическом сжатии давление насыщенного водяного пара остаётся постоянным, так как давление насыщенного пара зависит только от температуры. Поэтому процесс изображается на pV -диаграмме горизонтальным отрезком (см. рисунок а). В этом процессе объёмом сконденсировавшейся воды можно пренебречь вследствие того, что плотность воды гораздо больше плотности пара.



**При изотермическом сжатии сухого воздуха справедлив закон Бойля-Мариотта: давление обратно пропорционально объёму ($pV = \text{const}$). Графически такая зависимость представляет собой фрагмент гиперболы (см. рисунок б).
Источник: Сборник Монастырский Л.М. (Легион)**



Пример 10.

Три одинаковых сосуда, содержащих разреженный газ, соединены друг с другом трубками малого диаметра: первый сосуд – со вторым, второй – с третьим. Первоначально давление газа в сосудах было равно соответственно p , $3p$ и p . В ходе опыта сначала открыли и закрыли кран, соединяющий второй и третий сосуды, а затем открыли и закрыли кран, соединяющий первый сосуд со вторым. Как изменилось в итоге (уменьшилось, увеличилось или осталось неизменным) количество газа в первом сосуде? (Температура газа оставалась в течение всего опыта неизменной.)

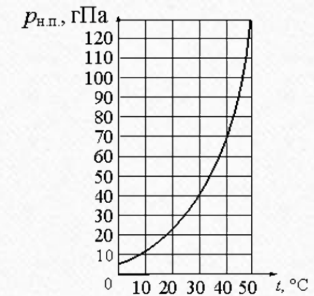
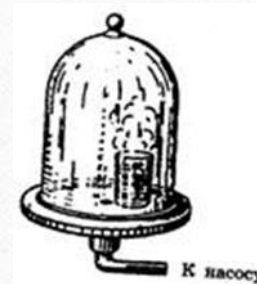
Решение.

1. В итоге количество газа в первом сосуде увеличилось
2. В соответствии с законами Дальтона и Бойля–Мариотта (примененными к парциальным давлениям газов во втором и третьем сосудах), суммарное давление этих газов после закрывания второго крана равно $\frac{3p}{2} + \frac{p}{2} = 2p$.
3. Аналогично этому давление в первом и втором сосудах после закрывания первого крана равно $\frac{p}{2} + \frac{2p}{2} = 1,5p$. Это означает, согласно уравнению Клапейрона–Менделеева, что количество газа в первом сосуде в итоге увеличилось.

<https://physege.sdamgia.ru/problem?id=7164&ysclid=lvfoq2ia4527864006>

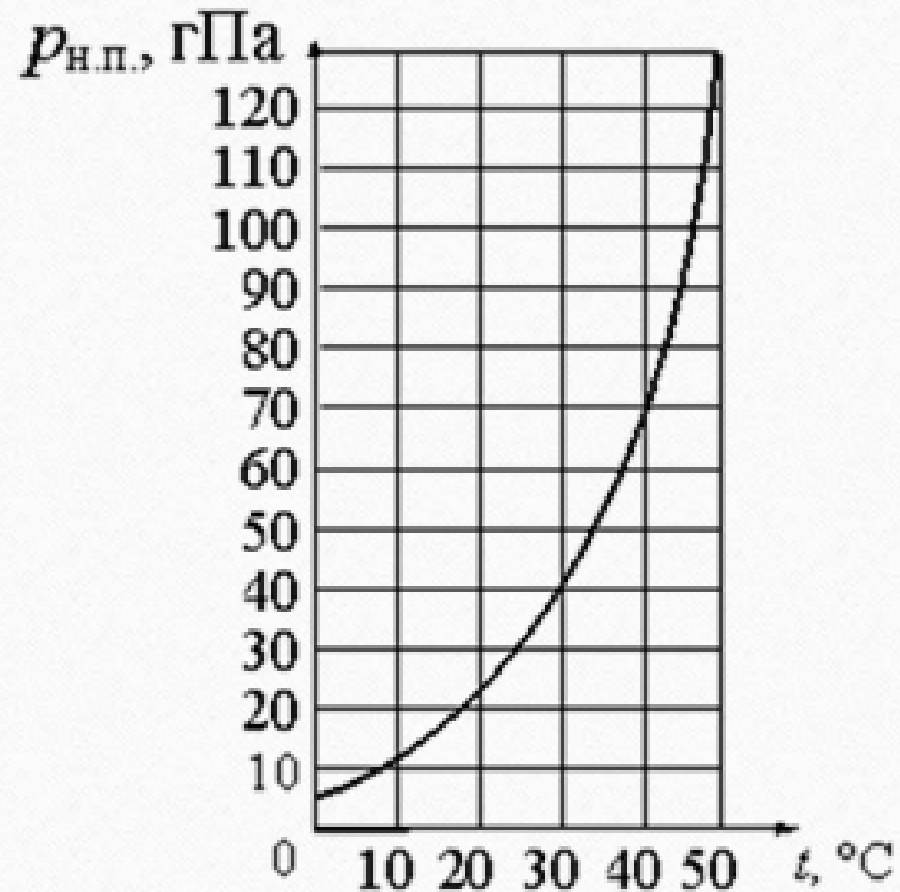
Пример 11.

В опыте, иллюстрирующем зависимость температуры кипения от давления воздуха (рис. а), кипение воды под колоколом воздушного насоса происходит уже при комнатной температуре, если давление достаточно мало. Используя график зависимости давления насыщенного пара от температуры (рис. б), укажите, какое давление воздуха нужно создать под колоколом насоса, чтобы вода закипела при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ответ поясните, указав, какие явления и закономерности Вы использовали для объяснения.



Кипением называется парообразование, которое происходит не только с поверхности жидкости, граничащей с воздухом, но и с поверхности пузырьков насыщенного пара, образующихся в толще жидкости, что резко увеличивает количество испарившейся жидкости. Всплывающие пузырьки вызывают интенсивное перемешивание жидкости. Когда давление внутри пузырьков пара равно сумме атмосферного давления и давления столба жидкости начнется процесс кипения:

$$p_{\text{н.п.}} = p_{\text{атм}} + \rho gh$$



В сосуде $\rho g h \ll p_{\text{атм}}$, поэтому условие возникновения кипения $p_{н.п.} = p_{\text{атм}}$. Следовательно, если давление воздуха под колоколом будет равно 40 гПа, то в соответствии с графиком температура кипения воды составит 30°C .

Свойства насыщенного пара.

У насыщенного пара есть важное свойство: его давление зависит от температуры и не зависит от объёма.

Описать процессы, происходящие с парами, можно с помощью уравнения Менделеева — Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M}RT,$$

Выразим из этого уравнения давление получим:

$$p = \frac{m}{M \cdot V} \cdot R \cdot T.$$

Увидим, что давление газа при постоянной температуре обратно пропорционально объёму. Ранее говорилось, что это не так.

Однако уравнение Менделеева — Клапейрона хорошо описывает и насыщенный, и ненасыщенный пар.

Масса насыщенного пара при изотермическом сжатии или расширении изменяется так, что давление пара остаётся прежним.

При расширении и сжатии насыщенного пара его масса изменяется за счёт меняющейся массы жидкости в этом же сосуде.

При увеличении объёма концентрация пара ненадолго уменьшается, но, как только пар становится ненасыщенным, испарение жидкости начинает опережать конденсацию. В результате этого масса пара быстро возрастает до тех пор, пока он не станет насыщенным.

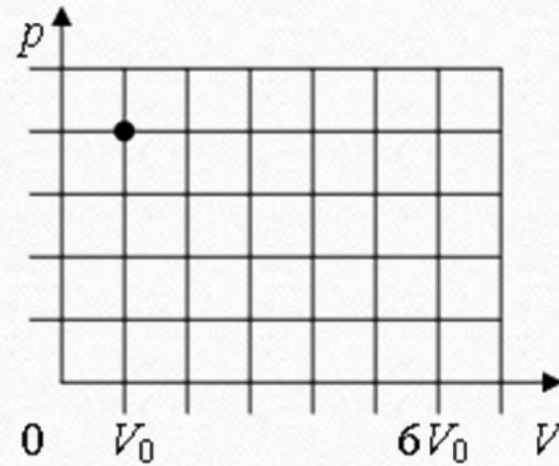
Давление пара становится прежним. Зависимость давления насыщенного пара от температуры измеряют на опыте. При этом можно получить графическую зависимость давления от температуры.

На графике мы видим, что с ростом температуры возрастает и давление насыщенного пара. Причина этого увеличения — в быстром росте массы насыщенного пара.

https://foxford.ru/wiki/fizika/par-vlazhnost?ysclid=lvfptc4qyu404335768&utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F

Пример 12.

В цилиндре под поршнем при комнатной температуре t_0 долгое время находится только вода и её пар. Масса жидкости в два раза больше массы пара. Первоначальное состояние системы показано точкой на pV -диаграмме. Медленно перемещая поршень, объём V под поршнем изотермически увеличивают от V_0 до $6V_0$. Постройте график зависимости давления p в цилиндре от объёма V на отрезке от V_0 до $6V_0$. Укажите, какими закономерностями Вы при этом воспользовались.



Ответ:

На участке от V_0 до $3V_0$ давление под поршнем постоянно (давление насыщенного пара на изотерме).

На участке от $3V_0$ до $6V_0$ давление под поршнем подчиняется закону Бойля — Мариотта.

На участке от V_0 до $3V_0$ график диаграммы p, V — горизонтальный отрезок прямой,

на участке от $3V_0$ до $6V_0$ — фрагмент гиперболы (для экспертов: отсутствие названий не снижает оценку, названия помогают оценке графика, сделанного от руки).

В начальном состоянии над водой находится насыщенный водяной пар, так как за длительное время в системе установилось термодинамическое равновесие.

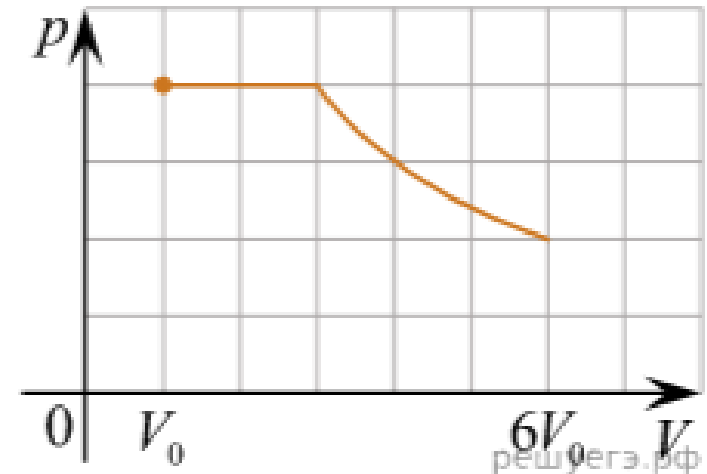
Пока в цилиндре остается вода, при медленном изотермическом расширении пар остается насыщенным. Поэтому график диаграмме $p - V$ будет графиком константы, то есть отрезком горизонтальной прямой.

Количество воды в цилиндре при этом убывает. При комнатной температуре концентрация молекул воды в насыщенном паре ничтожна по сравнению с концентрацией молекул воды в жидком агрегатном состоянии.

Масса воды в два раза больше массы пара. Поэтому, во-первых, в начальном состоянии насыщенный пар занимает объем, практически равный V_0 .

Во-вторых, чтобы вся вода испарилась, нужно объем под поршнем увеличить еще на $2V_0$.

При V больше $3V_0$ под поршнем уже нет жидкости, все молекулы воды образуют уже ненасыщенный водяной пар, который можно на изотерме описывать законом Бойля — Мариотта: $pV = \text{const}$, то есть p зависит от V обратно пропорционально. Графиком этой зависимости служит гипербола. Таким образом, на участке от $3V_0$ до $6V_0$ зависимость p от V изображается фрагментом гиперболы.



<https://phys-ege.sdangia.ru/problem?id=4148&ysclid=lvfpbzg63c349966208>

Используемые материалы:

- Навигатор самостоятельной подготовки к ЕГЭ <https://fipi.ru/navigator-podgotovki/navigator-ege>
- СДАМ ГИА: РЕШУ ЕГЭ Образовательный портал для подготовки к экзаменам <https://phys-ege.sdamgia.ru/problem?id=29750&ysclid=ltmlljy610286453760>
- <https://3.shkolkovo.online/>
<https://phys-ege.sdamgia.ru/problem?id=4148&ysclid=lvfpbzg63c349966208>

https://foxford.ru/wiki/fizika/par-vlazhnost?ysclid=lvfptc4qyu404335768&utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F