

§ 6. Изотермический, изобарный и изохорный процессы

Свойство газов существенно изменять предоставленный им объём широко используют в тепловых двигателях. Анализируя процессы, происходящие с газом в этих устройствах, важно знать, каким законам подчиняются газы и каковы условия применимости этих законов.

Процессы в газах часто происходят так, что изменяются только два параметра из пяти (p, V, T, m, M). Если при постоянных массе и молярной массе ещё один из макропараметров (p, V, T), входящих в уравнение состояния идеального газа, не изменяется, то такие процессы называют *изопроцессами*.

Изотермический процесс. Процесс изменения состояния физической системы при постоянной температуре ($T = \text{const}$) называют *изотермическим*.

Если при переходе из начального состояния в конечное масса и молярная масса идеального газа не изменяются, то из уравнения Клапейрона—Менделеева следует:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \text{const}, \text{ или } p = \frac{\nu RT}{V}, \text{ т. е. } p = \frac{\text{const}}{V}. \quad (6.1)$$

Давление данной массы газа при постоянных молярной массе и температуре обратно пропорционально его объёму.

Это утверждение называют *законом Бойля—Мариотта*.

Справедливость закона Бойля—Мариотта можно продемонстрировать экспериментально, используя установку, представленную на рисунке 18 в § 5.

Если медленно изменять объём газа, находящегося в сосуде, то вследствие теплообмена с окружающей средой можно поддерживать температуру газа в сосуде практически постоянной. При этом уменьшение объёма газа при вращении винта 3 повлечёт за собой увеличение его давления и некоторое незначительное увеличение температуры. И наоборот, увеличение объёма приведёт к уменьшению давления и некоторому незначительному уменьшению температуры газа*.

От теории к практике

1. Почему пузырьки воздуха, находящиеся в жидкости, поднимаясь вверх, увеличиваются в объёме?
2. Если, не отрываясь, выпить из пластиковой бутылки газированную воду, то можно обнаружить, что бутылка деформируется. Почему?

* Незначительное изменение температуры газа принципиально необходимо для теплообмена с термостатом — передача тепла возможна только при разных температурах тел.

График изотермического процесса, совершаемого идеальным газом, в координатах (p, V) представляет собой гиперболу (рис. 22). В физике такую кривую называют *изотермой*. Разным значениям температуры газа соответствуют разные изотермы. Согласно соотношениям (6.1) для одинаковых объёмов газов с одинаковыми количествами вещества и разными температурами чем больше давление, тем выше температура (рис. 22).

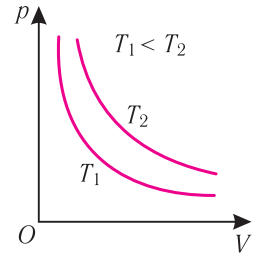


Рис. 22

Многочисленные опыты показали, что исследованные газы подчиняются закону Бойля—Мариотта тем точнее, чем меньше их плотность. При значительном увеличении давления газа этот закон перестаёт выполняться.

От теории к практике

Изобразите графики изотермического процесса в координатах (p, T) и (V, T) .

Интересно знать

Лёгкие расположены в грудной клетке, объём которой при дыхании периодически изменяется благодаря работе межрёберных мышц и диафрагмы. Когда грудная клетка расширяется, давление воздуха в лёгких становится меньше атмосферного, и воздух через воздухоносные пути устремляется в лёгкие — происходит вдох. При выдохе объём грудной клетки уменьшается, что вызывает уменьшение объёма лёгких. Давление воздуха в них становится выше атмосферного, и воздух из лёгких устремляется в окружающую среду.

Изобарный процесс. Процесс изменения состояния газа при постоянном давлении ($p = \text{const}$) называют *изобарным*.

В 1802 г. французский учёный Жозеф Гей-Люссак (1778—1850) рассмотрел этот процесс для воздуха, водорода, кислорода и азота.

Если при переходе из начального состояния в конечное масса и молярная масса газа не изменяются, то объём газа, как следует из уравнения Клапейрона—Менделеева:

$$V = \frac{mR}{pM}T \quad \text{или} \quad V = \frac{\nu R}{p}T, \quad \text{т. е.} \quad V = \text{const} T. \quad (6.2)$$

Объём данной массы газа при постоянных молярной массе и давлении прямо пропорционален абсолютной температуре.

Это утверждение называют *законом Гей-Люссака*.

Справедливость закона Гей-Люссака можно продемонстрировать экспериментально, используя установку, представленную на рисунке 23. Жидкость в сосуде находится в тепловом равновесии с тонкой трубкой, заполненной воздухом, запёртым капелькой масла. При увеличении температуры жидкости объём воздуха, находящегося в трубке под капелькой масла, возрастает и капелька движется вверх. При уменьшении температуры объём воздуха уменьшается — и капелька движется вниз.

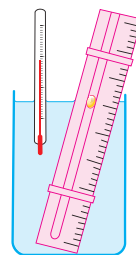


Рис. 23

От теории к практике

Можно ли считать расширение газа при медленном нагревании его в цилиндре с подвижным поршнем изобарным процессом?

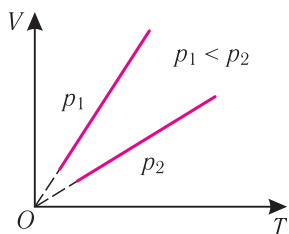


Рис. 24

Поскольку $V \sim T$, то в координатах (V, T) график изобарного процесса, совершаемого идеальным газом, представляет собой прямую линию, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 24). Эту линию называют *изобарой*.

Изобара реальных газов не может быть продлена до нулевого значения температуры (на графике пунктирная линия), потому что при низких температурах все газы существенно отличаются от модели «идеальный газ» и при дальнейшем уменьшении температуры превращаются в жидкости.

В одних и тех же координатах (V, T) можно построить несколько изобар, которые соответствуют разным давлениям данной массы идеального газа при неизменной молярной массе. Анализ соотношений (6.2) позволяет сделать вывод, что большему давлению соответствует меньший наклон изобары к оси температур (см. рис. 24).

От теории к практике

Изобразите графики изобарного процесса в координатах (p, V) и (p, T) .

Изохорный процесс. Процесс изменения состояния газа при постоянном объёме ($V = \text{const}$) называют *изохорным*.

Впервые этот процесс рассмотрел в 1787 г. французский учёный Жак Шарль (1746–1823)*.

* Несмотря на то что Шарль не опубликовал результаты своих исследований, история физики отдаёт приоритет открытия ему.

Если при переходе из начального состояния в конечное масса и молярная масса идеального газа не изменяются, то давление газа, как следует из уравнения Клапейрона–Менделеева:

$$p = \frac{mR}{VM}T \quad \text{или} \quad p = \frac{\nu R}{V}T, \quad \text{т. е.} \quad p = \text{const } T. \quad (6.3)$$

Давление данной массы газа при постоянных молярной массе и объёме прямо пропорционально абсолютной температуре.

Это утверждение называют *законом Шарля*.

Справедливость закона Шарля можно продемонстрировать экспериментально, используя установку, представленную на рисунке 25. Колба, наполненная воздухом и соединённая с манометром, находится в тепловом равновесии с жидкостью в сосуде. При увеличении температуры жидкости давление воздуха в колбе возрастает, а при уменьшении температуры — давление воздуха уменьшается.

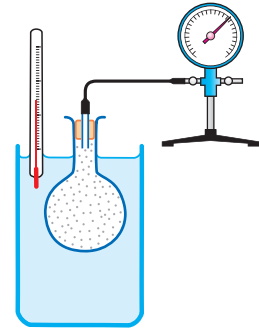


Рис. 25

От теории к практике

Идеальный газ определённой массы изохорно охлаждают так, что его температура уменьшается от $t_1 = 327 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 7 \text{ }^\circ\text{C}$. Во сколько раз уменьшается давление газа?

В координатах (p, T) график изохорного процесса, совершаемого идеальным газом, представляет собой прямую линию, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 26). Эту линию называют *изохорой*.

Как и в случае изобарного процесса, изохора реальных газов не может быть продлена до нулевого значения температуры.

В одних и тех же координатах (p, T) можно построить несколько изохор, соответствующих разным объёмам данной массы газа при неизменной молярной массе. Анализ соотношений (6.3) показывает, что большему объёму соответствует меньший наклон изохоры к оси температур (см. рис. 26).

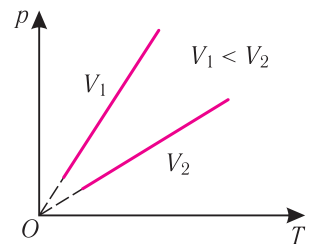
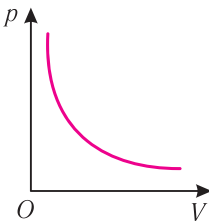
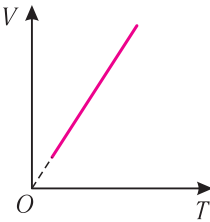
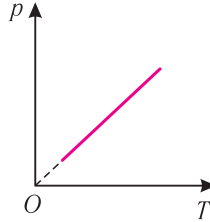


Рис. 26

От теории к практике

Изобразите графики изохорного процесса в координатах (p, V) и (V, T) .

Процесс изменения состояния идеального газа данной массы при неизменной молярной массе			
	изотермический	изобарный	изохорный
При постоянном макроскопическом параметре	$T = \text{const}$	$p = \text{const}$	$V = \text{const}$
Уравнение процесса	$p = \frac{\text{const}}{V},$ $p_1V_1 = p_2V_2$	$V = \text{const } T,$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	$p = \text{const } T,$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
Формулировка закона	Давление данной массы идеального газа при неизменных молярной массе и температуре обратно пропорционально его объёму	Объём данной массы идеального газа при неизменных молярной массе и давлении прямо пропорционален его абсолютной температуре	Давление данной массы идеального газа при неизменных молярной массе и объёме прямо пропорционально его абсолютной температуре
			



1. Как связаны давление и объём идеального газа при изотермическом процессе?
2. Как связаны объём и абсолютная температура идеального газа при изобарном процессе?
3. Как связаны давление и абсолютная температура идеального газа при изохорном процессе?
4. При выполнении каких условий справедлив каждый из законов изопроцессов в реальном газе?
5. Объём идеального газа определённой массы и неизменного химического состава изобарно увеличили в $b = 1,5$ раза, а затем давление газа изохорно уменьшили в $c = 3$ раза.
 - а) Как изменилась абсолютная температура газа в результате первого процесса?
 - б) Как изменилась абсолютная температура газа в результате второго процесса?
 - в) Во сколько раз начальная абсолютная температура газа отличается от его конечной температуры?
6. На рисунке 27 представлен график трёх процессов изменения состояния идеального газа определённой массы и неизменного химического состава.
 - а) Какому процессу соответствует участок $1 \rightarrow 2$ графика? Во сколько раз увеличилось давление газа в этом процессе?
 - б) Какому процессу соответствует участок $2 \rightarrow 3$ графика? Во сколько раз увеличились объём и абсолютная температура газа в этом процессе?
 - в) Какому процессу соответствует участок $3 \rightarrow 4$ графика? Как и во сколько раз изменились объём и давление газа в этом процессе?
 - г) Во сколько раз следует уменьшить температуру газа, чтобы изохорно перевести газ из состояния 2 в состояние 4?

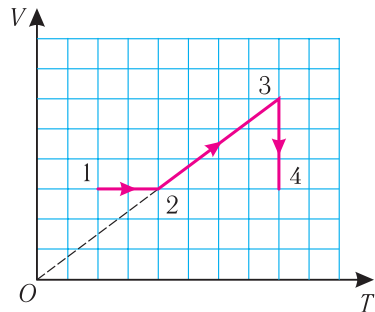


Рис. 27

Примеры решения задач

Пример 1. На рисунке 28 представлен график трёх процессов изменения состояния некоторой массы идеального газа. Как изменялись параметры газа на участках $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 1$? Изобразите эти процессы в координатах (p, V) и (p, T) .

Решение. На участке $1 \rightarrow 2$ объём газа прямо пропорционален абсолютной температуре, следовательно, процесс перехода газа из

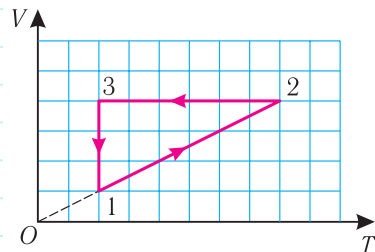


Рис. 28

состояния 1 в состояние 2 является изобарным. Из графика следует, что в состоянии 2 температура и объём газа больше в 4 раза, чем в состоянии 1. Следовательно, в процессе изобарного расширения некоторой массы газа из состояния 1 в состояние 2 температура и объём газа увеличились. Это можно записать таким образом:

переход $1 \rightarrow 2$: $p = \text{const}$, $V \uparrow$, $T \uparrow$, $V_2 = 4V_1$, $T_2 = 4T_1 \Rightarrow$
происходит изобарное нагревание газа.

В процессе перехода газа из состояния 2 в состояние 3 остаётся постоянным объём (процесс изохорный), а температура газа уменьшается в 4 раза. Из соотношения (6.3) следует, что при изохорном охлаждении давление газа уменьшается пропорционально его абсолютной температуре. Поэтому можно записать:

переход $2 \rightarrow 3$: $V = \text{const}$, $T \downarrow$, $p \downarrow$, $p_3 = \frac{T_3}{T_2} p_2 = \frac{1}{4} p_2 \Rightarrow$
происходит изохорное охлаждение газа.

Процесс перехода газа из состояния 3 в состояние 1 — изотермический. При этом объём газа уменьшается в 4 раза, что влечёт за собой, согласно закону Бойля—Мариотта, увеличение давления газа в 4 раза:

переход $3 \rightarrow 1$: $T = \text{const}$, $V \downarrow$, $p \uparrow \Rightarrow$
происходит изотермическое сжатие газа.

Опираясь на сделанные выводы, представим все три процесса в координатах (p, V) и (p, T) (рис. 29, а, б).

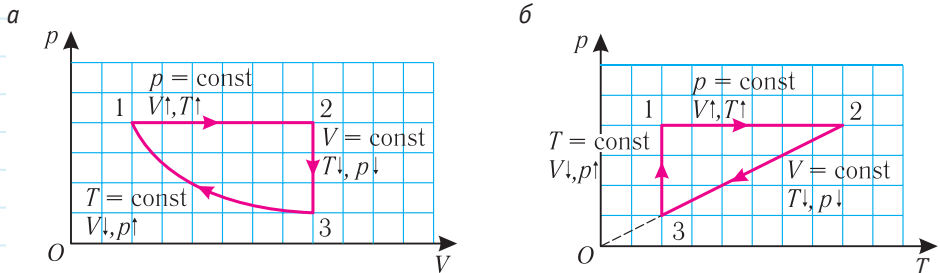


Рис. 29

Пример 2. При изотермическом расширении идеального газа определённой массы его объём увеличился от $V_1 = 2,0$ л до $V_2 = 5,0$ л, а давление уменьшилось на $\Delta p = -15$ кПа. Определите первоначальное давление газа.

Дано:

$$V_1 = 2,0 \text{ л} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_2 = 5,0 \text{ л} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$\Delta p = -15 \text{ кПа} = -1,5 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

p_1 — ?

Откуда

Решение. Так как температура и масса газа не изменяются, то его начальное и конечное состояния связаны законом Бойля–Мариотта, т. е. $p_1 V_1 = p_2 V_2$. С учётом того, что $p_2 = p_1 + \Delta p$, получим:

$$p_1 V_1 = (p_1 + \Delta p) V_2.$$

$$p_1 = \frac{\Delta p V_2}{V_1 - V_2}.$$

$$p_1 = \frac{-1,5 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Па} = 25 \text{ кПа}.$$

Ответ: $p_1 = 25$ кПа.



Упражнение 5

1. При изобарном увеличении температуры идеального газа, находящегося в герметично закрытом цилиндре, на $\Delta T = 60,0$ К его объём увеличился в $\beta = 1,21$ раза. Определите начальную абсолютную температуру газа.

2. Изобразите графически процесс изобарного охлаждения определённой массы идеального газа в координатах (p, T) ; (V, T) ; (V, p) .

3. Идеальный газ определённой массы сначала изобарно расширили, а затем изотермически сжали до первоначального объёма. Изобразите графически эти процессы в координатах (V, T) ; (p, V) .

4. На рисунке 30 представлен график изменения состояния определённой массы идеального газа. (Переход $3 \rightarrow 1$ осуществляется при неизменной температуре.) Изобразите графически этот процесс в координатах (T, V) и (p, T) .

5. При температуре $t_1 = -3,0$ °С манометр на баллоне со сжатым кислородом показывал давление $p_1 = 1,8 \cdot 10^6$ Па, а при температуре $t_2 = 27$ °С — давление $p_2 = 2,0 \cdot 10^6$ Па. Определите, была ли утечка газа из баллона.

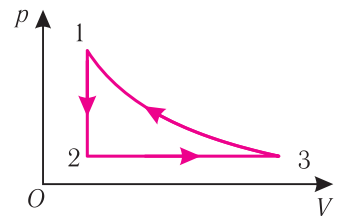
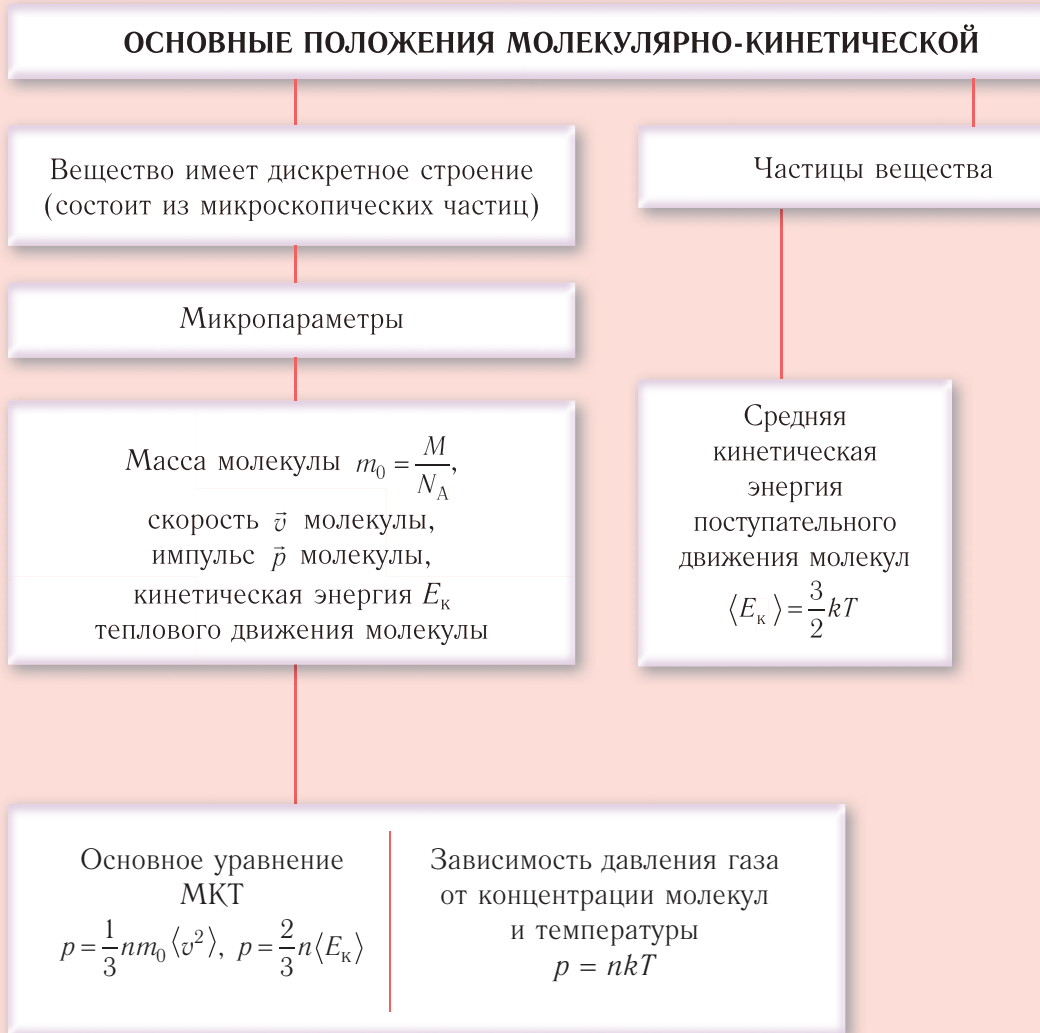


Рис. 30



Обобщение и систематизация знаний



ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

беспорядочно движутся

Средняя
квадратичная
скорость движения
молекул газа

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

Частицы вещества
взаимодействуют между собой

Макропараметры

Давление | Объём | Температура

Уравнение состояния идеального газа

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

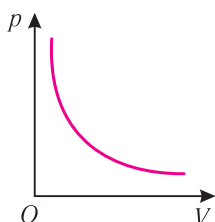
Уравнение Клапейрона, связывающее
два любых состояния идеального газа
при неизменных массе и его молярной

$$\text{массе: } \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Изотермический
процесс

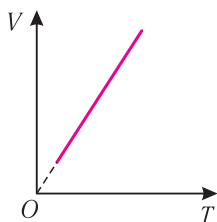
$$p = \frac{\text{const}}{V}$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Изобарный
процесс

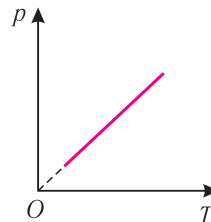
$$V = \text{const } T$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Изохорный
процесс

$$p = \text{const } T$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$



Задания для самоконтроля

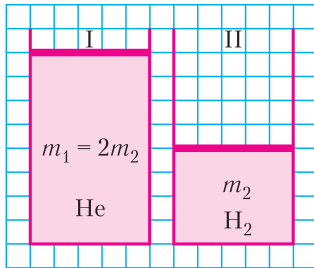


Рис. 31

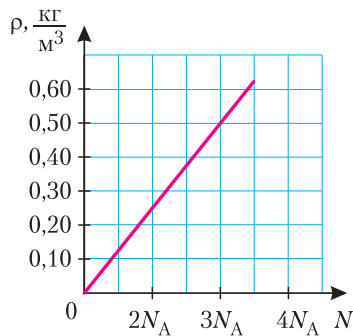


Рис. 32

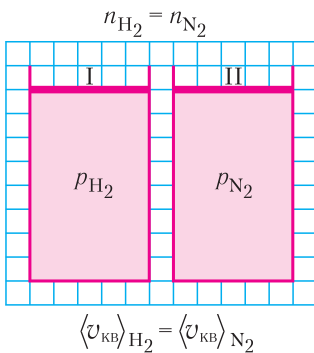


Рис. 33

1. Определите отношение концентрации частиц во втором сосуде к концентрации частиц в первом сосуде (рис. 31).

2. На графике (рис. 32) представлена зависимость плотности водорода H_2 от числа его молекул в сосуде. Определите вместимость сосуда.

3. В сосуд с водой бросили кристаллик поваренной соли $NaCl$ массой $m = 2,0$ мг. Спустя некоторый промежуток времени соль, растворившись, распределилась равномерно по всему объёму воды так, что в каждом кубическом миллиметре раствора оказалось $N_1 = 6,0 \cdot 10^{12}$ ионов натрия. Определите объём воды в сосуде.

4. Концентрации молекул водорода и азота в сосудах и средние квадратичные скорости их движения одинаковые (рис. 33). Определите, во сколько раз давление азота больше давления водорода.

5. На рисунке 34 представлен график зависимости давления газа в баллоне газонаполненной электрической лампы от среднего квадрата скорости теплового движения его молекул. Определите плотность газа в баллоне лампы.

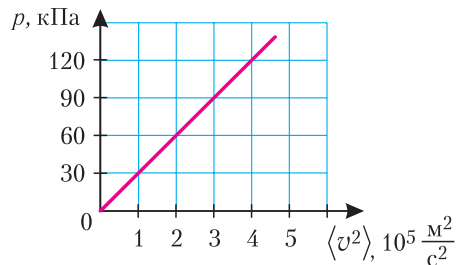


Рис. 34

6. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газов в обоих сосудах одинаковая и составляет $\langle E_k \rangle = 3,15 \cdot 10^{-21}$ Дж (рис. 35). Определите концентрацию газа в первом сосуде.

7. Давление гелия в сосуде $p = 0,36$ МПа, а его плотность $\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Определите среднюю кинетическую энергию теплового движения атомов гелия.

8. При переходе из состояния 1 в состояние 2 средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа изменялась так, как представлено на графике (рис. 36). Определите температуру газа в состоянии 2.

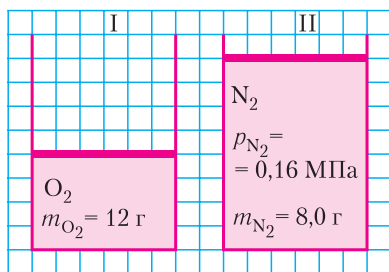


Рис. 35

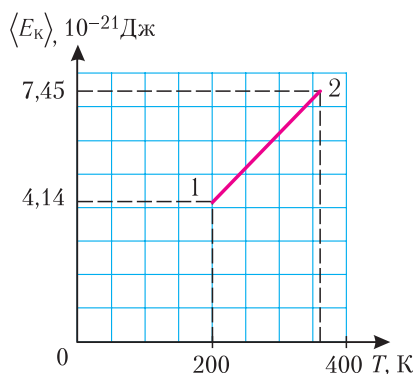


Рис. 36

9. Под поршнем в цилиндре находится идеальный газ. В таблице представлены некоторые параметры газа при переходе из начального состояния в конечное. Определите объём, предоставленный газу в конечном состоянии.

Состояние	Параметры газа		
	Давление	Абсолютная температура	Объём
Начальное	p_1	T_1	$V_1 = 2 \text{ л}$
Конечное	$p_2 = 4p_1$	$T_2 = 2T_1$	V_2

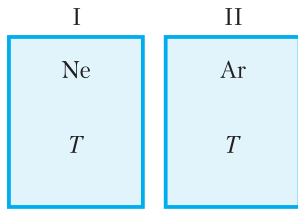


Рис. 37

10. Определите отношение $\frac{\langle v_{\text{квI}} \rangle}{\langle v_{\text{квII}} \rangle}$ средних квадратичных скоростей теплового движения атомов газов, находящихся в сосудах (рис. 37).

11. Кинетическая энергия теплового движения всех частиц идеального одноатомного газа, находящегося в герметично закрытом баллоне, $E_k = 12$ кДж. Определите давление газа, если вместимость баллона $V = 20$ л.

12. На рисунке 38 представлен график зависимости давления идеального газа, количество вещества которого $\nu = 10$ моль, от абсолютной температуры. Определите объём газа.

13. На рисунке 39 представлены графики зависимости давления идеального газа определённой массы от объёма при постоянных значениях T_1 и T_2 абсолютной температуры. Определите температуру T_2 газа, если температура $T_1 = 210$ К.

14. После изохорного нагревания идеального газа определённой массы от температуры $T_1 = 300$ К до температуры $T_2 = 420$ К и последующего изобарного нагревания газ был переведён в начальное состояние в процессе, при котором давление уменьшается прямо пропорционально объёму. Определите температуру идеального газа после изобарного нагревания.

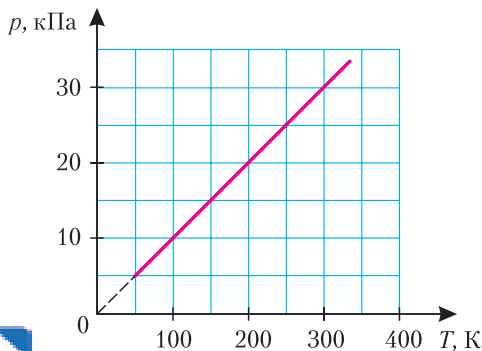


Рис. 38

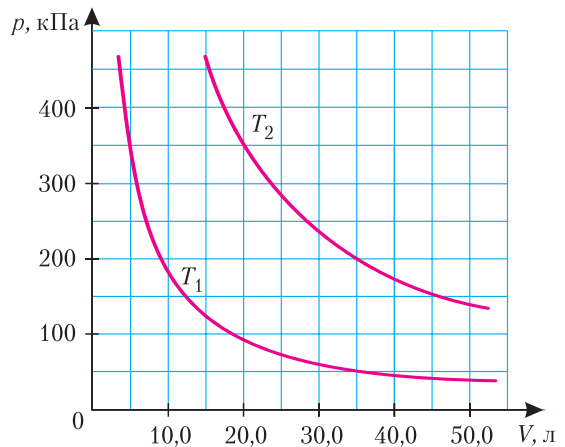


Рис. 39