

© Ольшевский Андрей Георгиевич
Консультирую по скайп da.irk.ru
Сайт www.super-code.ru наполняется бесплатными книгами

Молекулярно-кинетическая теория

2017

Оглавление

1. Молекулярная физика3
 - 1.1. Газовые законы18
 - 1.1.1. Изотермический процесс20
 - 1.1.2. Изобарный процесс27
 - 1.1.3. Изохорный процесс32
 - 1.1.4. Адиабатный процесс36
 - 1.2. Работа, совершенная газом37
 - 1.3. Первый закон термодинамики41
 - 1.4. Кипение воды52
 - 1.5. Конденсация пара52
 - 1.6. Относительная влажность воздуха54
 - 1.7. Решение задач по МКТ и термодинамике56
2. Перевод единиц измерения59
3. Список литературы59

1. Молекулярная физика

Объем V слоя масла

$$V = Sd,$$

где S – площадь поверхности, м^2 ;

d – толщина слоя масла, равная размеру молекулы масла, м .

Размер молекулы оливкового масла

$$d \approx 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 1,7 \text{ нм}.$$

Размер атома водорода

$$d \approx 10^{-10} \text{ м} = 10^{-1} \text{ нм}.$$

Размер молекулы оливкового масла в 17 раз больше атома водорода.

Диаметр молекулы воды

$$d \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,3 \text{ нм}.$$

Относительная молекулярная (или атомная) масса вещества:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}},$$

где M_r – относительная молекулярная (атомная) масса, а.е.м.;

m_0 – масса молекулы (или атома) вещества, кг .

m_{0C} – масса атома углерода, $m_{0C} = 1,995 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

Масса молекулы или атома

$$m_0 = M_r \frac{1}{12} m_{0C}$$

1/12 массы атома углерода равна 1 атомной единице массы (1 а.е.м.):

$$m_{0C}/12 = 1 \text{ а.е.м.} = 1,6625 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Масса атома (молекулы) m_0 равна относительной атомной (молекулярной) массе M_r , умноженной на атомную единицу массы (а.е.м.)

$$m_0 = M_r \cdot \text{а.е.м.} = M_r \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Относительные атомные массы веществ, указанные в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева, округляются до целого числа. Например, относительная атомная масса водорода равна 1, углерода — 12, кислорода — 16.

Для определения относительной молекулярной массы вещества, необходимо по его химической формуле установить сколько атомов определенных элементов содержится в веществе.

Например, определим относительную молекулярную массу воды. В молекуле воды H_2O содержится 2 атома водорода и атом кислорода. Относительная молекулярная масса воды равна сумме относительных атомных масс 2-х атомов водорода и атома кислорода

$$2 \cdot M_{rH} + M_{rO} = 2 \cdot 1 + 16 = 18$$

Молярная масса — это масса одного моля. Молярная масса вещества определяется путем умножении относительной молекулярной

массы вещества на $10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

Например, молярная масса водорода H_2 равна

$$M_{\text{H}_2} = M_{r\text{H}_2} \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 2 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

Один моль водорода весит 2 грамма.

Молярная масса воды H_2O равна

$$M_{H_2O} = M_{rH_2O} \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль} = 18 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль} = 18 \frac{г}{моль}.$$

Таким образом, один моль воды весит 18 грамм. Один грамм воды занимает объем 1 см^3 (один «кубик»), следовательно 1 моль занимает объем 18 см^3 или кубик со стороной 2,62 см.

Число Авагадро показывает количество молекул вещества в одном моле и равно:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Молекулы газа, движущиеся с большой скоростью, ударяются в стенки сосуда, создавая давление. С ростом температуры растет скорость движения молекул, кинетическая энергия и давление газа. Уменьшение температуры сопровождается уменьшением кинетической энергии и давления.

$$M = m_0 N_A = \frac{m}{\nu}$$

Импульс, передаваемый стенке, в которую ударяют атомы или молекулы газа, равен изменению импульса атомов или молекул, ударяющих стенку

$$\Delta p = \frac{1}{3} m_0 n v^2 S$$

Импульс силы, создаваемой ударяющими стенку атомами или молекулами, равен изменению импульса этих атомов или молекул

$$F \Delta t = \Delta p$$

Импульс силы за единицу времени равен изменению импульса атомов или молекул

$$F \cdot t = \Delta p$$
$$F = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2 S$$

Давление на стенку, создаваемое множественными ударами атомов или молекул

$$p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2$$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2$$

где m_0 – масса атома или молекулы,

\bar{v} – среднеквадратичная скорость молекул,

n – концентрация молекул, $\frac{\text{количество молекул}}{\text{объем}} = \frac{1}{M^3} = M^{-3}$,

$$n = \frac{N}{V}$$

$$N = \frac{m}{m_0}$$

$$n = \frac{\frac{m}{m_0}}{V} = \frac{m}{m_0 V} = \frac{\rho}{m_0}$$

$$\rho = m_0 n$$

Плотность и концентрация связаны между собой массой молекулы

(атома) m_0 , поэтому они увеличиваются или уменьшаются одновременно.

$$p = \frac{1}{3} \rho v^2$$

$$[p] = \left[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2} \right] = \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Па}]$$

Движущиеся молекулы обладают средней кинетической энергией

$$\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$$

Отсюда

$$m_0 \bar{v}^2 = 2\bar{E}$$

после подстановки получаем:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}$$

Вместе с тем давление

$$p = nkT,$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – абсолютная температура, К.

$$T = t + 273,15$$

где t – температура в градусах Цельсия.

Объем

$$V = \frac{N}{n}$$

Приравняем значения p :

$$nkT = \frac{2}{3} n \bar{E}$$

Температура — мера средней кинетической энергии молекул

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

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT = \frac{m_0\bar{v}^2}{2}$$

$$\frac{m_0\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT$$

$$m_0\bar{v}^2 = 3kT$$

Отсюда среднеквадратичная скорость движения молекул

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

Внутренняя энергия газа равна кинетической энергии молекул

$$U = N\bar{E}_K = N \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}\nu N_A kT,$$

где N – количество молекул;

k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – абсолютная температура, К.

Температура является мерой средней кинетической энергии молекул и, следовательно, внутренней энергии. Увеличение или уменьшение температуры и внутренней энергии происходят одновременно.

Универсальная молярная газовая постоянная равна

$$R = kN_A,$$

где N_A - число Авагадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Количество вещества ν (ню) — это количество молей

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$$

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона):

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (1)$$

где p – давление газа, Па;

V – объем газа, м³;

m – масса газа, кг;

M – молярная масса, кг/моль;

R – молярная газовая постоянная, $R \approx 8,31$ Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура газа, К.

Уравнение (1) можно записать в виде

$$pV = \nu RT$$

$$pV = \frac{N}{N_A} RT$$

$$p = \frac{N}{VN_A} RT$$

$$p = \frac{n}{N_A} RT$$

Преобразование к виду

$$\frac{pV}{T} = \nu R$$

объясняет закон Авогадро: в равных объемах идеальных газов при одинаковой температуре и давлении содержится равное число молекул.

Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT,$$

где i – число степеней свободы, принимающее для идеального газа значения:

3 — для одноатомного,

5 — для двухатомного,

6 — для остальных идеальных газов.

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i}{2} \Delta(pV) = \frac{i}{2} p \Delta V = \frac{i}{2} \Delta p V$$

Изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$$

Задача. Во сколько раз масса и объем изделия из свинца больше массы и объема аналогичного изделия из олова, при условии, что в них содержится равное количество вещества [7]?

Решение

Количество вещества, моль

$$\nu = \frac{m}{M},$$

где m – масса, кг;

M – молярная масса, кг/моль.

Так как количество свинца и олова одинаково, то

$$\frac{m_{Pb}}{M_{Pb}} = \frac{m_{Sn}}{M_{Sn}},$$

где m_{Pb} – масса свинца, кг/моль;

$M_{Pb} = 207 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса свинца;

m_{Sn} – масса олова, кг/моль;

$M_{Sn} = 119 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса олова, кг/моль.

Отношение масс свинца и олова

$$\frac{m_{Pb}}{m_{Sn}} = \frac{M_{Pb}}{M_{Sn}} = \frac{207 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{119 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \approx 1,74$$

Объем

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

$$\frac{V_{Pb}}{V_{Sn}} = \frac{\frac{m_{Pb}}{\rho_{Pb}}}{\frac{m_{Sn}}{\rho_{Sn}}} = \frac{m_{Pb} \rho_{Sn}}{m_{Sn} \rho_{Pb}} = \frac{M_{Pb} \rho_{Sn}}{M_{Sn} \rho_{Pb}},$$

где $\rho_{Pb} = 11,3415 \cdot 10^3$ кг/м³ – плотность свинца;

$\rho_{Sn} = 7,31$ г/см³ = $7,31 \cdot 10^3$ кг/м³ – плотность олова, кг/м³.

$$\frac{V_{Pb}}{V_{Sn}} = \frac{207 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \cdot 7,31 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3}{119 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \cdot 11,3415 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3} = \frac{207 \cdot 7,31}{119 \cdot 11,3415} \approx 1,12$$

Ответ: масса и плотность свинца примерно в 2 раза больше массы и плотности олова при одинаковом числе атомов, а объемы почти равны.

Задача. Как изменится давление газа, если концентрация его молекул увеличится в 3 раза, а средняя скорость уменьшится в 3 раза [7]?

Решение

Первоначальное давление, Па

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v^2,$$

где m_0 – масса атома или молекулы, кг;

n – концентрация молекул, м^{-3} ;

\bar{v} – среднеквадратичная скорость молекул, м/с .

Во втором случае давление

$$p_2 = \frac{1}{3} m_0 3n \left(\frac{\bar{v}}{3} \right)^2 = 3 \cdot \frac{1}{3} m_0 n \frac{\bar{v}^2}{3^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2 = \frac{1}{3} p$$

Ответ: давление газа уменьшится в 3 раза.

Задача. Какова средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при 300°C [7]?

Дано: $T = 573 \text{ К}$. \bar{E} - ?

Решение

Средняя кинетическая энергия молекул, Дж

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

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$;

T – абсолютная температура, К.

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 573 \text{ К} \approx 1,186 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$$

Ответ: $\bar{E} \approx 1,2 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$.

Задача. Как изменится температура идеального газа заданной массы, если его объем уменьшить вдвое, а давление увеличить вдвое [7]?

Решение

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона):

$$pV = \frac{m}{M} RT , \tag{1}$$

где p – давление газа, Па;

V – объем газа, м^3 ;

m – масса газа, кг;

M – молярная масса, кг/моль;

R – молярная газовая постоянная, $R \approx 8,31$ Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура газа, К.

Выразим первоначальную температуру

$$T_1 = \frac{pVM}{mR}$$

Температура во втором случае

$$T_2 = \frac{2p \frac{V}{2} M}{mR} = \frac{pVM}{mR} = T_1$$

Ответ: температура не изменится.

Задача В4 [2; стр 40]. Дано: O_2 ; $t = 12$ °С, $p = 10^5$ Па. ρ - ?

Решение

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона):

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

$$p = \frac{m}{VM} RT$$

$$p = \frac{\rho}{M} RT$$

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

$$T = 273 + t = 273 + 12 = 285 \text{ К}$$

$$M_{O_2} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$$

$$\rho = \frac{10^5 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 285} = \frac{10^2 \cdot 32}{8,31 \cdot 285} = 1,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Ответ: $\rho = 1,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Задача С1 [2; стр 41]. Дано: $p_1 = p_2$. Почему изобара 1 лежит выше изобары 2?

Решение

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона):

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

Переменные величины перенесем влево, постоянные - вправо

$$\frac{V}{mT} = \frac{R}{pM}$$

Обозначим постоянные справа через r

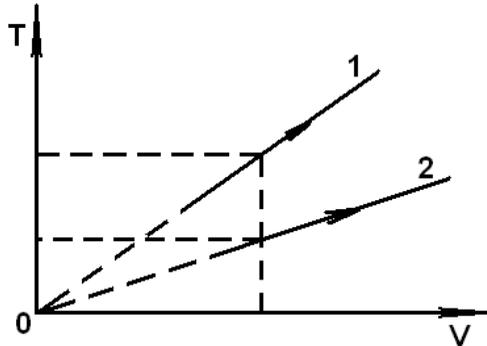
$$\frac{V}{mT} = \frac{R}{pM} = r$$

$$\frac{V}{mT} = r$$

Запишем функциональную зависимость $T(V)$

$$T = \frac{V}{rm}$$

При одинаковом объеме порций газа большую температуру получим при меньшей массе газа.



Изобара 1 лежит выше изобары 2 так как масса порции 1 газа меньше массы порции 2.

Задача С2 [2; стр 41]. Дано: водород Н, $T = 6000 \text{ К}$; $v_2 = 6,1 \cdot 10^5 \text{ м/с}$. Смогут ли все атомы водорода улететь с поверхности Солнца?

Решение

Среднеквадратичная скорость движения молекул

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана;

m_0 — масса атомов водорода.

$$m_0 = M_r \cdot \text{а.е.м.} = 1 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 6000}{1,66 \cdot 10^{-27}}} \approx 12,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} < v_2 = 6,1 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Ответ: все атомы водорода с поверхности Солнца улететь не смогут.

Задача С3 [2; стр 41]. Дано: $m_{\text{Нс}} = 120 \text{ кг}$; $m = 300 \text{ кг}$; $t = 10 \text{ }^\circ\text{С}$; $p = 10^5 \text{ Па}$. $m_{\text{оболочки}}$ - ?

Решение

Сила Архимеда, равная весу вытесненного воздуха уравнивает

силы тяжести гелия, оболочки, груза:

$$F_A = F_{T \text{ гелия}} + F_{T \text{ оболочки}} + F_{T \text{ груза}}$$

$$m_{\text{среды}}g = m_{\text{гелия}}g + m_{\text{оболочки}}g + m_{\text{груза}}g$$

Масса вытесненного воздуха равна массе гелия, оболочки, груза

$$m_{\text{среды}} = m_{\text{гелия}} + m_{\text{оболочки}} + m_{\text{груза}}$$

$$m_{\text{оболочки}} = m_{\text{среды}} - m_{\text{гелия}} - m_{\text{груза}}$$

Определим объем, занимаемый 120 кг гелия при температуре 10 °С из уравнения Менделеева

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

$$V = \frac{m_{\text{He}}RT}{M_{\text{He}}p}$$

Молярная масса гелия $M = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Молярная масса воздуха $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Масса воздуха из уравнения Менделеева

$$m_{\text{воздуха}} = \frac{pVM_{\text{воздуха}}}{RT}$$

Подставляем объем вытесненного гелием воздуха

$$m_{\text{воздуха}} = \frac{p \cdot \frac{m_{\text{He}}RT}{M_{\text{He}}p} \cdot M_{\text{воздуха}}}{RT} = \frac{m_{\text{He}}RTM_{\text{воздуха}}}{RTM_{\text{He}}} = \frac{m_{\text{He}}M_{\text{воздуха}}}{M_{\text{He}}}$$

$$m_{\text{воздуха}} = \frac{120 \text{ кг} \cdot 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{моль}}{4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{моль}} = 870 \text{ кг}$$

$$m_{\text{оболочки}} = 870 - 120 - 300 = 450 \text{ кг}$$

Ответ: $m_{\text{оболочки}} = 450 \text{ кг}$.

Задача С4 [2; стр 41]. Дано: $H = 60 \text{ см} = 60 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $m = 10 \text{ г} = 10^{-2} \text{ кг}$; $h = 25 \text{ см} = 25 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$. $v - ?$

Решение

Согласно третьего закона Ньютона сила противодействия равна силе действия

$$F = F_{\text{т}} \quad (1)$$

Сила, возникающая из-за разности давлений

$$F = S\Delta p$$

Полость сверху поршня обозначим буквой v , полость ниже поршня — буквой h , тогда

$$\Delta p = p_{\text{н}} - p_{\text{в}}$$

Сила, удерживающая поршень

$$F = S(p_{\text{н}} - p_{\text{в}}) = Sp_{\text{н}} - Sp_{\text{в}}$$

Подставим F и силу тяжести в уравнение (1)

$$Sp_{\text{н}} - Sp_{\text{в}} = mg \quad (2)$$

Согласно уравнения Менделеева — Клапейрона

$$pV = \nu RT$$

Объем равен произведению площади поршня S на высоту h или H части газа, разделенную поршнем. Для верхней части запишем уравнение

$$p_{\text{в}}S(H - h) = \nu RT$$

$$p_B S = \frac{\nu R T}{H - h}$$

Для нижней части уравнение

$$p_H S h = \nu R T$$

$$p_H S = \frac{\nu R T}{h}$$

$$p_H S - p_B S = \frac{\nu R T}{h} - \frac{\nu R T}{H - h} = \nu R T \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{H - h} \right) = \nu R T \frac{H - 2h}{h(H - h)}$$

Подставляем во (2) уравнение

$$\nu R T \frac{H - 2h}{h(H - h)} = mg$$

Количество газа в каждой части цилиндра

$$\nu = \frac{mg}{R T \frac{H - 2h}{h(H - h)}} = \frac{mgh(H - h)}{R T (H - 2h)}$$

Абсолютная температура сосуда

$$T = 273 + t = 273 + 27 = 300 \text{ К}$$

$$\nu = \frac{10^{-2} \cdot 10 \cdot 25 \cdot 10^{-2} (60 \cdot 10^{-2} - 25 \cdot 10^{-2})}{8,31 \cdot 300 \cdot (60 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 25 \cdot 10^{-2})} = \frac{10^{-3} \cdot 5 \cdot 35}{831 \cdot 6} = 3,51 \cdot 10^{-5} \text{ моль}$$

Ответ: $\nu = 3,51 \cdot 10^{-5}$ моль.

1.1. Газовые законы

Газовые законы имеют огромное значение в физической науке и технике. В газах изменение одних параметров вызывает изменение других.

Если газ и его масса не изменяются, то в уравнении Менделеева – Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (1)$$

в правой части можно оставить постоянные величины:

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R. \quad (2)$$

Правая часть уравнения (2) является постоянной величиной, поэтому можно записать уравнение Клапейрона (универсальный газовый закон):

$$\frac{pV}{T} = const. \quad (3)$$

При переходе газа из первого состояния в другие (1→2→3) из уравнения (3) следует

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3} = const. \quad (4)$$

Часто процессы в газах можно приближенно рассматривать как процессы, в которых изменяется минимально возможное число параметров - два из пяти возможных в уравнении состояния идеального газа (1). Важнейшую роль в физике и технике играют три изопрцесса – изотермический, изобарный, изохорный. В изопрцессах один из параметров уравнения (3) является постоянным, но два других неизбежно изменяются.

A11. [2; стр].

Дано: $p_1 = 5 \cdot 10^4$ Па; $p_2 = 10 \cdot 10^4$ Па; $V_1 = 1$ м³; $V_2 = 4$ м³. $T_2 = f(T_1)$ - ?

Решение

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

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} T_1 = \frac{10 \cdot 10^4 \cdot 4}{5 \cdot 10^4 \cdot 1} T_1 = 8T_1$$

Ответ: $T_2 = 8T_1$.

A12. [2; стр.].

Дано: $V_{\min} < V_{\max}$; $T_{\min} < T_{\max}$.

Решение

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3}$$

$$\frac{p_1 V_{\max}}{T_{\min}} = \frac{p_2 V_{\max}}{T_{\max}} = \frac{p_3 V_{\min}}{T_{\max}}$$

$$p_1 < p_2 < p_3.$$

Ответ: p_3 .

1.1.1. Изотермический процесс

Изотермический процесс происходит при постоянной температуре ($T = \text{const}$) и, следовательно, при неизменной внутренней энергии. Из уравнения (3) следует:

$$pV = \text{const} . \tag{4}$$

Это **закон Бойля – Мариотта**. Переход газа из первого состояния во второе ($1 \rightarrow 2$) на основании уравнения (4) описывается уравнением:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 . \tag{5}$$

Отсюда

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} . \tag{6}$$

При постоянной температуре во сколько раз увеличится давление, во столько раз уменьшится объем. Примером практического осуществления изотермического процесса является объем газа в цилиндре с поршнем. При увеличении (уменьшении) давления газа в цилиндре для сохранения неизменной температуры объем необходимо уменьшать (увеличивать).

Изотермический процесс изображается изотермой (гиперболой) на pV – диаграмме. Для некоторых значений параметров на рисунке 1 изображена изотерма:

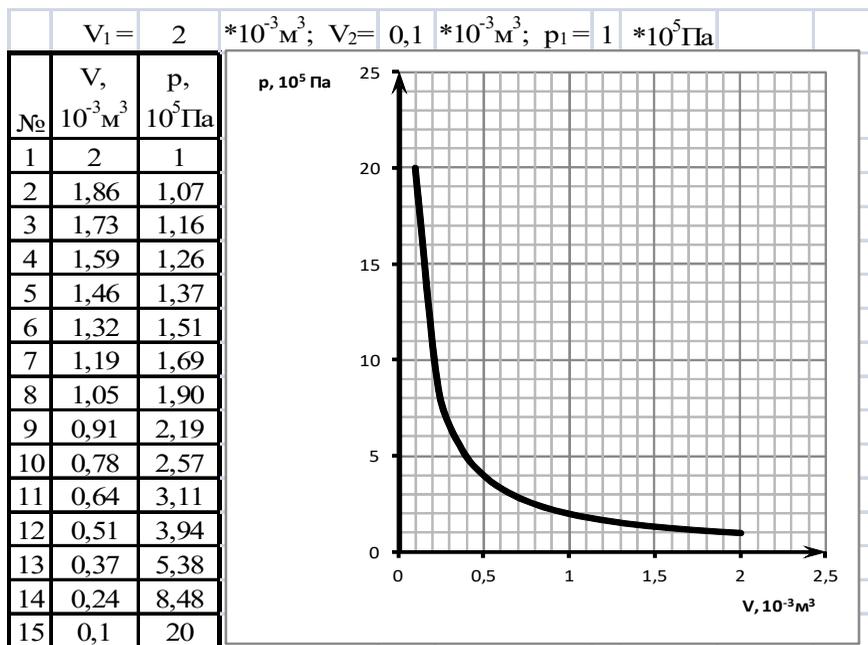


Рис. 1. Изотерма в осях pV .

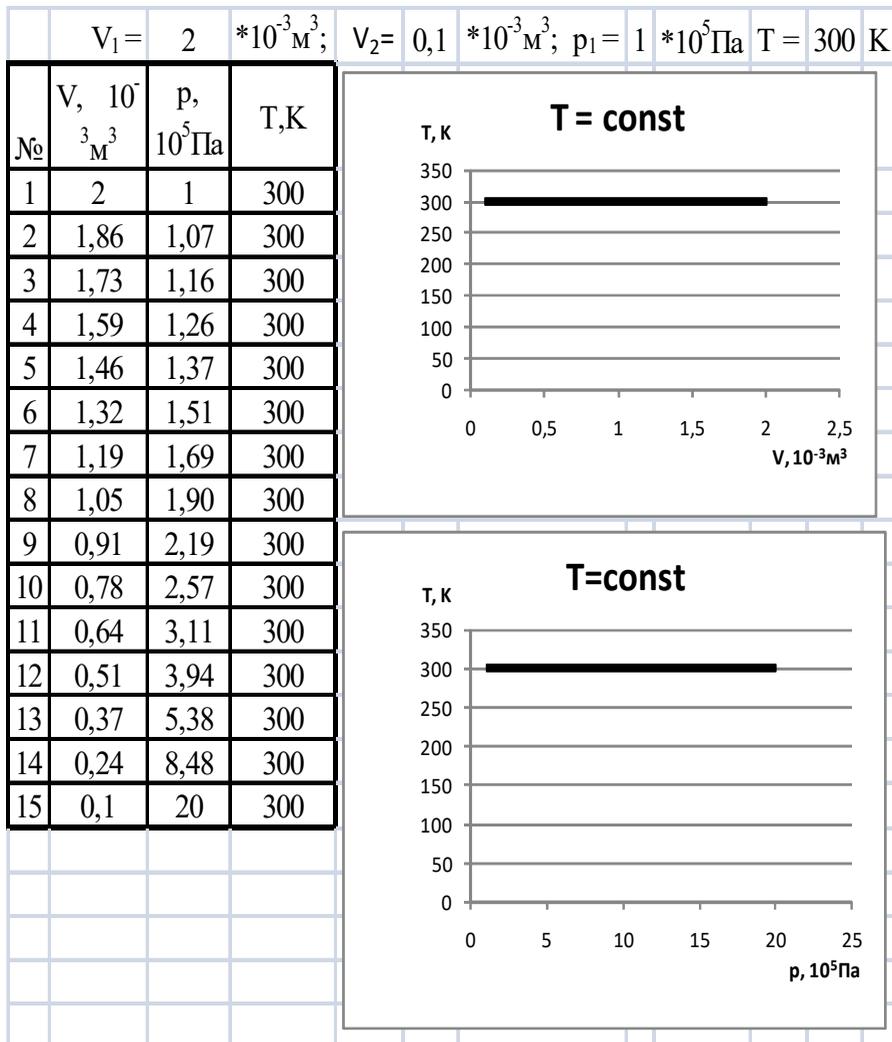
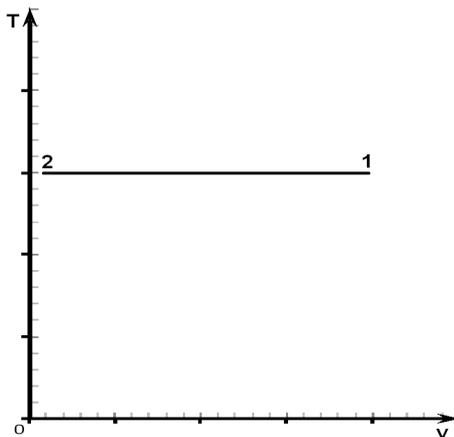
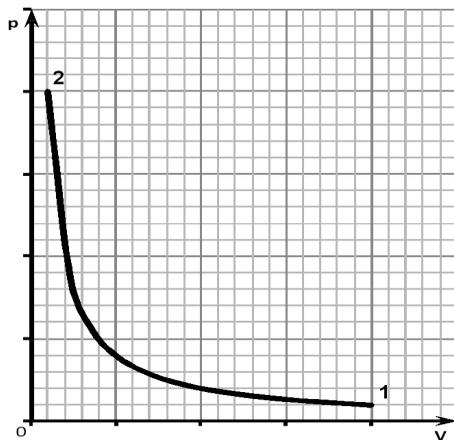
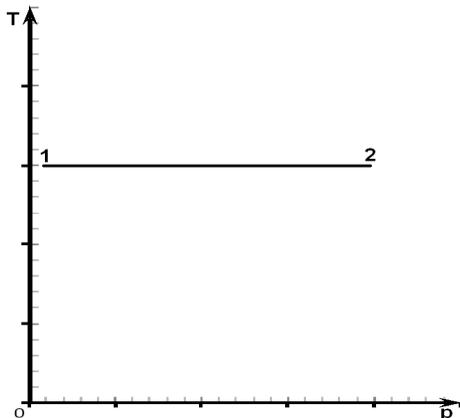


Рис. 2. Изотерма в осях TV и Tp.





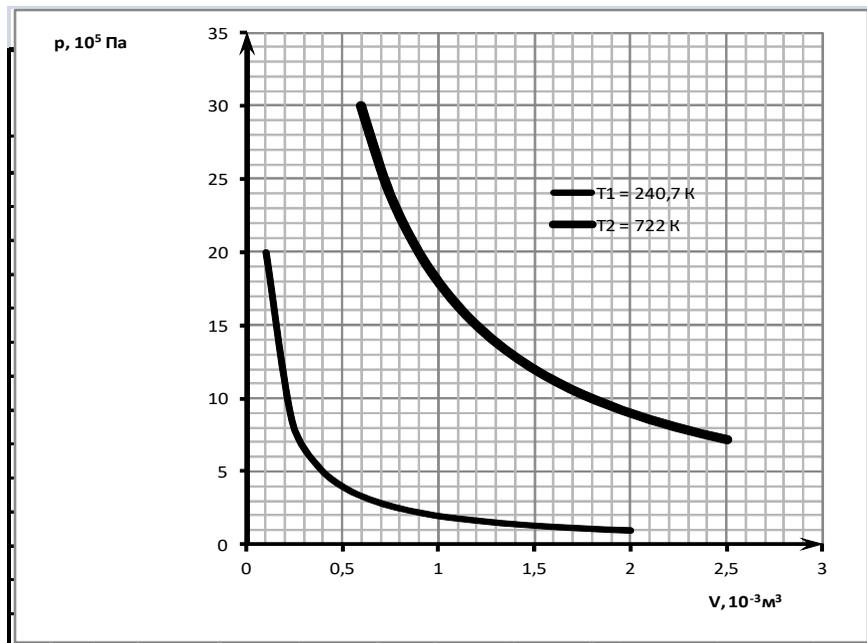
При изотермическом процессе если газ и его масса не изменяются, то в уравнении Менделеева – Клапейрона

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

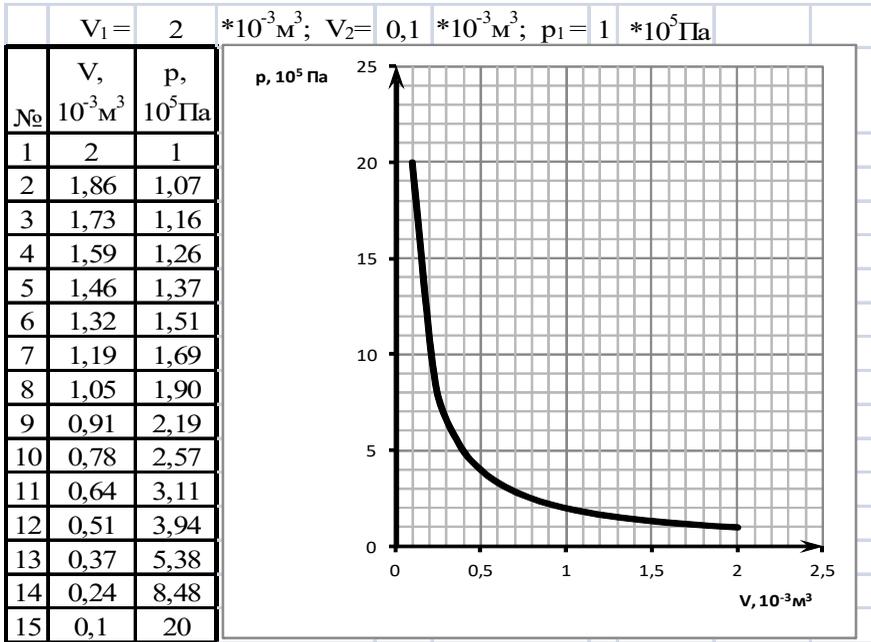
в правой части постоянные величины:

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

Большому значению температуры T соответствует большее значение произведения pV и выше расположенная изотерма на диаграмме pV . Если температура увеличится в 9 раз, то и давление, и объем должны возрасти, например, в 3 раза.



Задача. Для какой температуры построена изотерма на графике изменения давления 0,1 моля идеального газа?



Решение

Из уравнения Менделеева

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

записанного в виде

$$pV = \nu RT$$

выразим температуру

$$T = \frac{pV}{\nu R}$$

Подставляем $p = 10^5 \text{ Па}$, $V = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, 0,1 моль и $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$

$$T = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{0,1 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}} = \frac{2 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \text{ м}^3 \text{ К}}{8,31 \text{ Дж}} \approx 240,7 \frac{\text{НмК}}{\text{Дж}} \approx 241 \frac{\text{ДжК}}{\text{Дж}} = 241 \text{ К}$$

1.1.2. Изобарный процесс

Изобарным называется процесс при постоянном давлении ($p = \text{const}$). Из уравнения (3) вытекает:

$$\frac{V}{T} = \text{const} . \quad (7)$$

Это **закон Гей-Люссака**. Переход газа из первого состояния во второе ($1 \rightarrow 2$) на основании уравнения (7) описывается уравнением:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} . \quad (8)$$

Отсюда

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} . \quad (9)$$

При постоянном давлении увеличение объема сопровождается увеличением температуры и внутренней энергии. Примером практического осуществления изобарного процесса является объем газа в цилиндре с поршнем. При нагреве (охлаждении) газа в цилиндре для сохранения неизменного давления объем необходимо увеличивать (уменьшать).

Изобара на VT диаграмме является прямой, проходящей через начало координат. Для некоторых параметров на рисунке 2 изображена изобара.

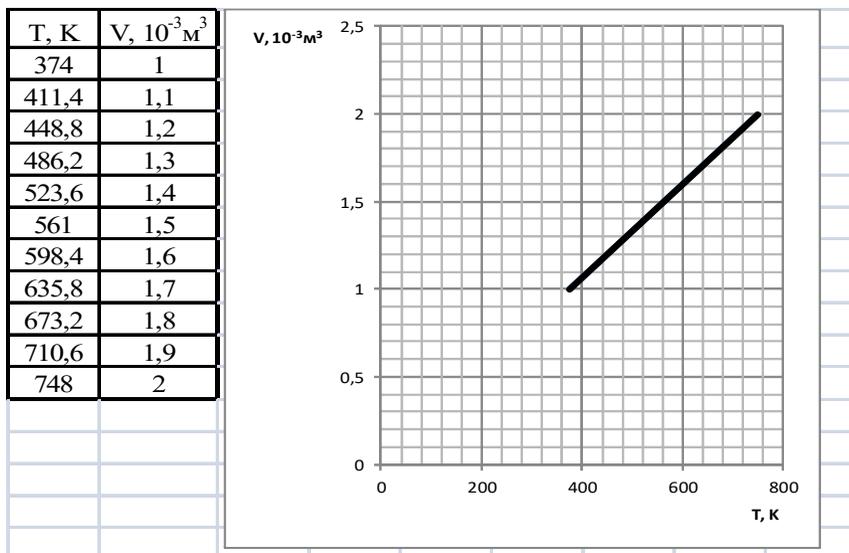
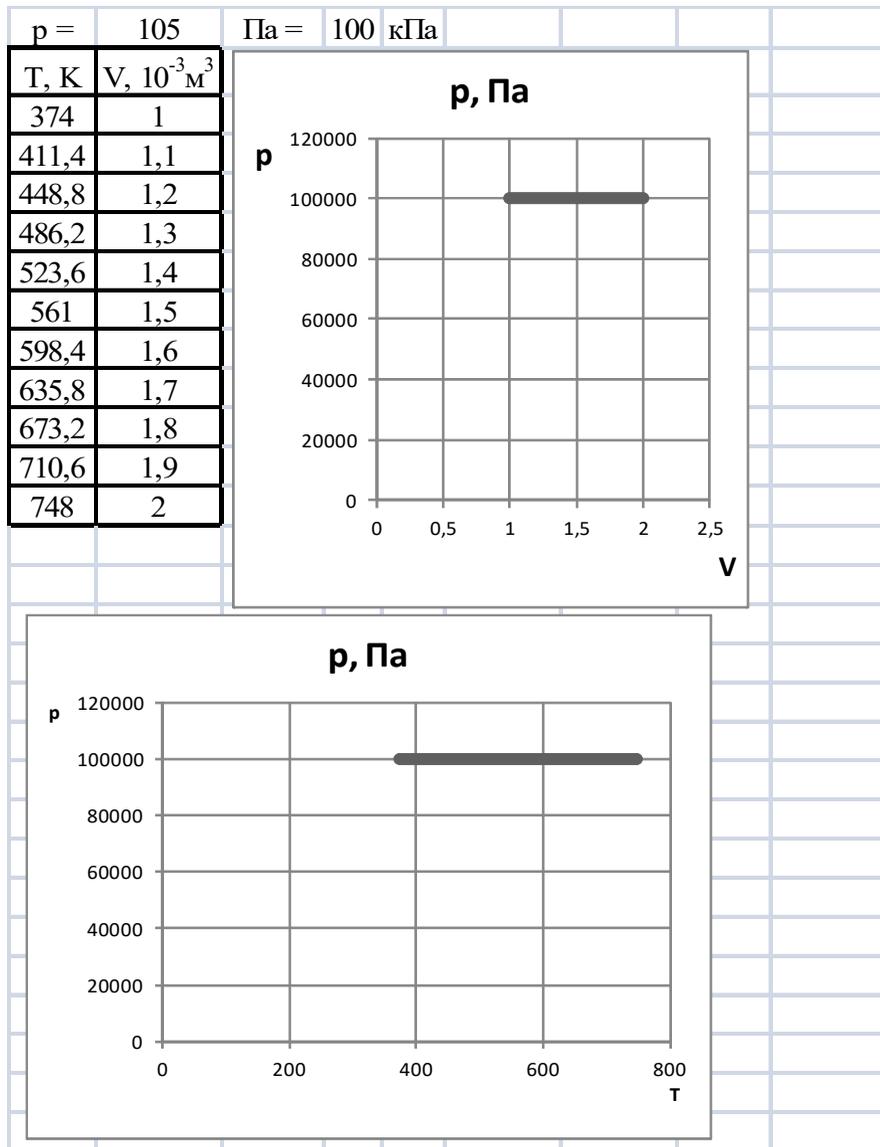
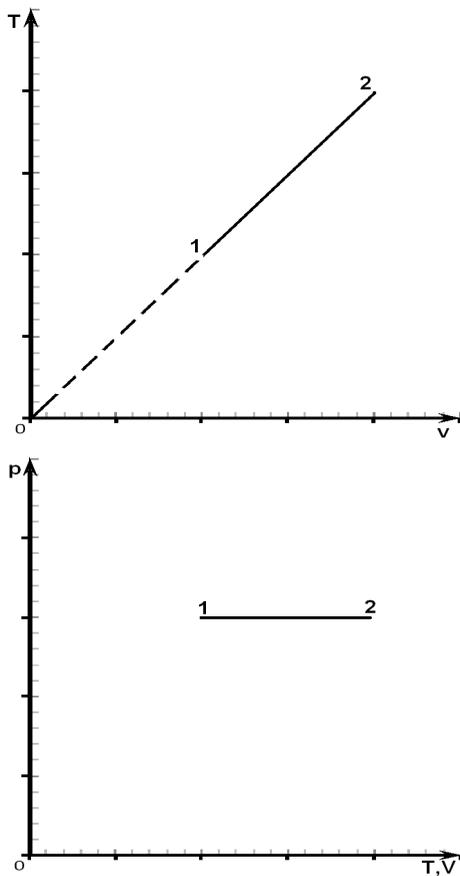


Рис. 2. Изобара





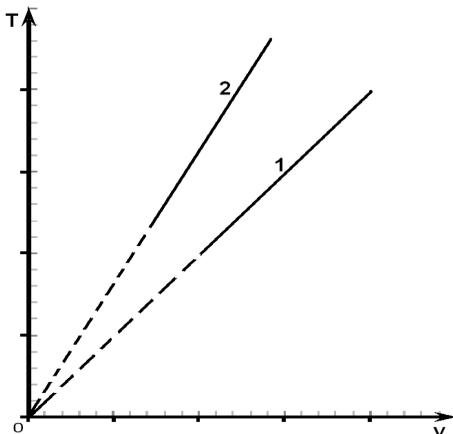
При изобарном процессе если газ и его масса не изменяются, то из уравнения Менделеева – Клапейрона

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

выразим T:

$$T = \frac{1}{\frac{m}{M} R} pV$$

При одинаковом объеме большему значению давления p соответствует большее значение температуры и выше расположенная изобара 2 на диаграмме TV:



из уравнения Менделеева – Клапейрона выразим V :

$$V = \frac{m}{pM} RT$$

При одинаковой температуре большему значению давления p соответствует меньшее значение объема и левее расположенная изобара 2 на диаграмме TV.

Изменим состояние газа от $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ до какого-то нового значения температуры t . Абсолютная температура изменится от $T_0 = 273,15\text{K}$ до

$$T = 273,15 + t.$$

Тогда объем изменится от V_0 до V . Уравнение, связывающее это изменение параметров

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V}{T},$$

тогда объем определяется по формуле

$$V = V_0 \frac{T}{T_0} = V_0 \frac{T}{273,15} = V_0 \alpha T = V_0 \alpha (273,15 + t) = V_0 (1 + \alpha t),$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1}{273,15}.$$

Зная объем при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ можем определить объем при другой температуре

$$V = V_0 \alpha T = V_0 (1 + \alpha t).$$

1.1.3. Изохорный процесс

Изохорным называется процесс при постоянном объеме ($V = \text{const}$, закрытый сосуд). Из уравнения (3):

$$\frac{p}{T} = \text{const}. \quad (10)$$

Это **закон Шарля**. Переход газа из первого состояния во второе ($1 \rightarrow 2$) на основании уравнения (10) описывается уравнением:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \quad (11)$$

Отсюда

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (12)$$

При постоянном объеме увеличение давления сопровождается увеличением температуры (нагрев закрытого сосуда). Изохора на pT диаграмме является прямой, проходящей через начало координат. Для некоторых варьируемых параметров на рисунке 3 изображена изохора.

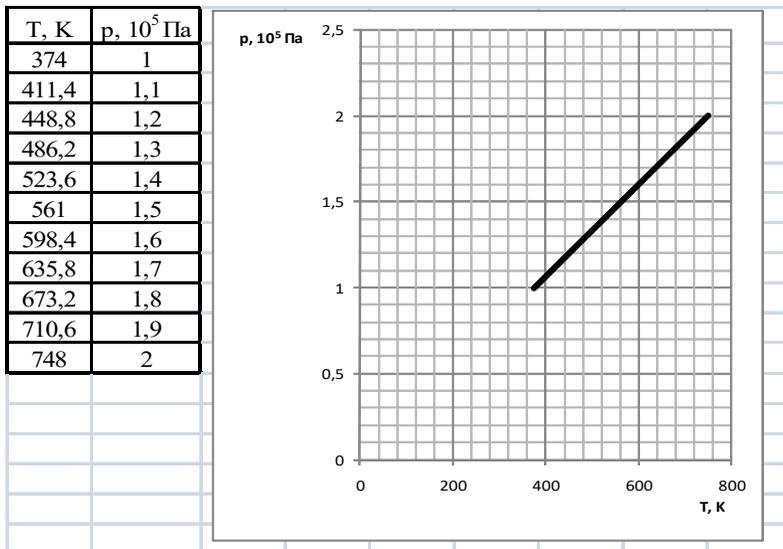
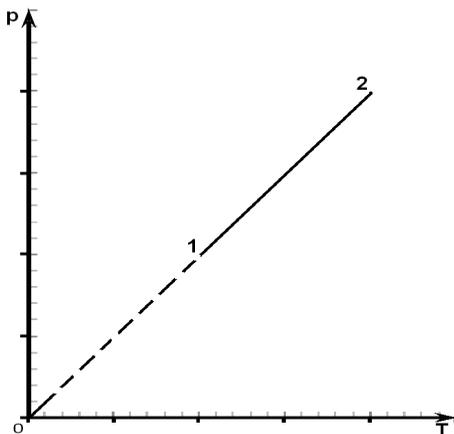
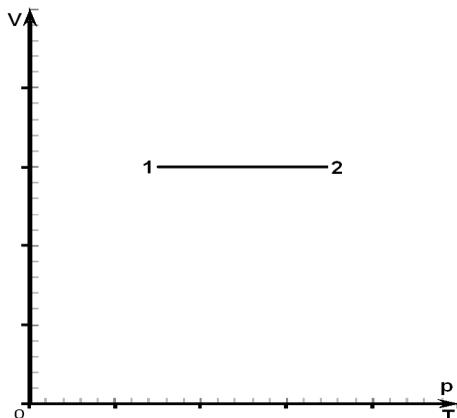


Рис. 3. Изохора





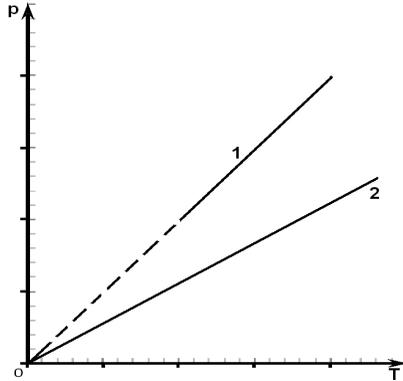
При изохорном процессе если газ и его масса не изменяются, то из уравнения Менделеева – Клапейрона

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

выразим p :

$$p = \frac{1}{V} \frac{m}{M} RT$$

При одинаковой температуре большему значению объема V соответствует меньшее значение давления и ниже расположенная изохора 2 на диаграмме pT :



из уравнения Менделеева – Клапейрона выразим T :

$$T = \frac{1}{\frac{m}{M} R} pV$$

При одинаковом объеме большему значению давления p соответствует большая температура и правее расположенная изохора 2 на диаграмме pT .

Изменим состояние газа от $t_0 = 0^\circ\text{C}$ до какого-то нового значения температуры t . Абсолютная температура изменится от $T_0 = 273,15\text{K}$ до

$$T = 273,15 + t.$$

Тогда давление изменится от p_0 до p . Уравнение, связывающее это изменение параметров

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p}{T},$$

тогда давление определяется по формуле

$$p = p_0 \frac{T}{T_0} = p_0 \frac{T}{273,15} = p_0 \alpha T = p_0 \alpha (273,15 + t) = p_0 (1 + \alpha t),$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1}{273,15}.$$

Зная давление при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ можем определить давление при другой температуре

$$p = p_0 \alpha T = p_0 (1 + \alpha t).$$

Все графики изопроцессов являются прямыми. Лишь изотермический процесс является гиперболой на диаграмме, не содержащей ось изопараметра T . Графики изобарного и изохорного процессов на диаграммах, не содержащих оси изопараметра, являются прямыми, проходящими через начало координат. Графики изопроцессов на диаграммах, содержащих ось изопараметра, являются прямыми, перпендикулярными оси изопараметра.

1.1.4. Адиабатный процесс

Адиабатным называется процесс без теплообмена с окружающей средой ($Q = 0$). Уравнение адиабаты

$$pV^k = \text{const},$$

где k – показатель адиабаты (для воздуха $k = 1,4$).

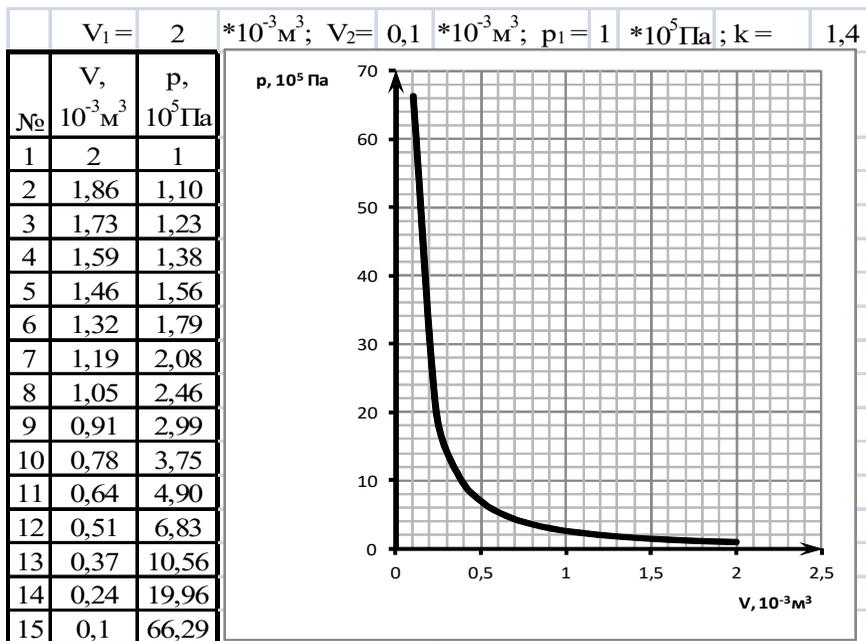
Примером адиабатного процесса является резкое сжатие (расширение) газа под поршнем в цилиндре. За короткое время не успевает произойти теплообмен с окружающей средой.

Переход газа из первого состояния во второе ($1 \rightarrow 2$) описывается уравнением:

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^k$$

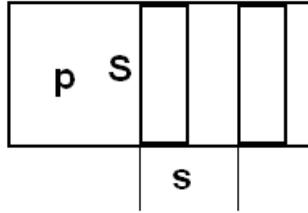
$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k$$



1.2. Работа, совершенная газом

В механике работа определялась как сила F, умноженная на перемещение s в направлении действия силы

$$A = Fs \tag{1}$$



Сила F давления на поршень, Н

$$F = pS,$$

где p – давление, Па;

S – площадь поршня, m^2 .

Изменение объема

$$\Delta V = Ss$$

Отсюда перемещение s

$$s = \frac{\Delta V}{S}$$

Подставляем в формулу (1) силу и перемещение

$$A = Fs = pS \cdot \frac{\Delta V}{S} = p\Delta V$$

Получили формулу для определения работы, совершенной газом

$$A = p\Delta V.$$

Если давление или изменение объема (изохорный процесс) равны нулю, то равна нулю и работа, совершенная газом.

Работа, совершенная газом равна площади криволинейной трапеции под графиком функции $p = p(V)$

По формуле Ньютона-Лейбница площадь криволинейной трапеции

$$A = S = \int_{V_1}^{V_2} p(V)dV = P(V)|_{V_1}^{V_2} = P(V_2) - P(V_1)$$

Работа цикла равна площади цикла на диаграмме $p = p(V)$

Задача С1 /Сл2 стр 48/. Найти работу цикла.

Решение

Построим диаграмму pV , используя диаграмму pT

Универсальный газовый закон

$$\frac{pV}{T} = const = \nu R$$

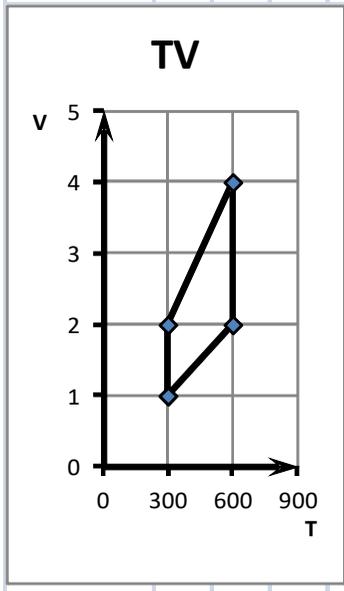
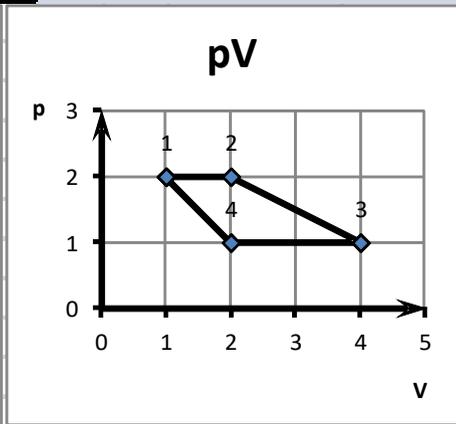
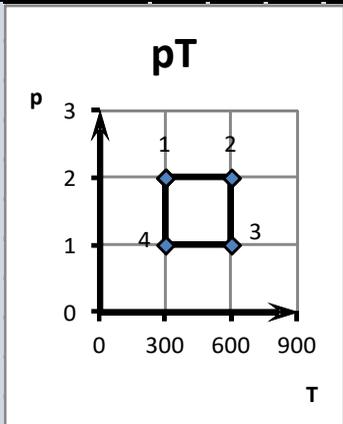
Отсюда объем

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

Работа равна площади фигуры под графиком функции $p = p(V)$.

Рассчитаем площади фигур под разными участками диаграммы pV и сведем их в таблицу. На участке 2 - 3 диаграммы pV работа газа максимальная.

Состояния	1	2	3	4
$p, 10^5 \text{ Па}$	2	2	1	1
$T, \text{ К}$	300	600	600	300
$V, 10^{-3} \text{ м}^3$	1	2	4	2



Участок		$A = p\Delta V, \text{ Дж}$
1	2	200
2	3	300
3	4	-200
4	1	-150
Цикл 1-2-3-4-1		150

Ответ: наибольшая по абсолютной величине работа на участке 2-3.

1.3. Первый закон термодинамики

Если нагревать закрытый сосуд с газом (изохорный процесс), то температура (внутренняя энергия) и давление внутри сосуда возрастают. Если прочность сосуда не достаточна, то сосуд взорвется (совершится работа по разрушению сосуда). Если нагревать газ в цилиндре под поршнем, то температура газа возрастает и газ поднимает поршень (если сила давления достаточна для преодоления сил, противодействующих движению поршня).

Теплота, подведенная к системе расходуется на увеличение внутренней энергии (температуры и давления) системы и на совершение системой работы над внешними телами:

$$Q = \Delta U + A',$$

где Q — теплота, подведенная к системе, Дж;

ΔU – изменение внутренней энергии системы, Дж;

A' – работа, совершенная системой над внешними телами, Дж.

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i}{2} \Delta(pV) = \frac{i}{2} p \Delta V = \frac{i}{2} \Delta p V$$

$$Q = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T + A'$$

$$Q = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1) + A'$$

$$Q = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (273 + t_2 - (273 + t_1)) + A'$$

$$Q = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (t_2 - t_1) + A'$$

$$Q = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta t + A'$$

Работа, совершенная газом

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$$

$$A' = p \Delta V,$$

где ΔV — изменение объема, м³,

p — давление, Па.

Работа A , совершенная внешними силами над системой:

$$A = - A'$$

$$Q = \Delta U - A,$$

$$A = \Delta U - Q$$

Работа, совершенная над системой, расходуется на увеличение внутренней энергии системы и выделяется в виде теплоты. Пример: сжатие воздуха в насосе при накачивании шин.

При изохорном процессе изменение объема равно нулю $\Delta V = 0$, поэтому $A = - A' = 0$. Уравнение первого закона термодинамики принимает вид:

$$Q = \Delta U.$$

При изохорном процессе теплота, подведенная к газу расходуется на увеличение его внутренней энергии (температуры и давления). Отведение теплоты от газа сопровождается уменьшением внутренней энергии, следовательно температуры и давления.

$$Q = \Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i}{2} \Delta p V$$

При нагреве или охлаждении газа теплота определяется по формуле

$$Q = cm\Delta T$$

Подставим Q и ΔU

$$cm\Delta T = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R\Delta T$$

сократим $m\Delta T$ и получим формулу расчета удельной теплоемкости

$$c = \frac{i}{2} \frac{R}{M}$$

При адиабатном процессе отсутствует теплообмен с окружающей средой, поэтому $Q = 0$. Уравнение первого закона термодинамики принимает вид

$$\Delta U + A' = 0$$

Изменение внутренней энергии происходит лишь при совершении работы газом или над газом

$$\Delta U = -A' = A$$

При адиабатном процессе увеличение внутренней энергии (температуры) происходит за счет совершения работы внешними телами над системой. Совершение работы системы над внешними телами происходит за счет уменьшения внутренней энергии (температуры) системы.

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R\Delta T = \frac{i}{2} \Delta(pV) = -\Delta(pV)$$

Примером адиабатного увеличения внутренней энергии газа при совершении работы над газом, является нагрев насоса при резком сжатии воздуха под поршнем насоса. Можно считать что за это время не успевают произойти теплообмен с окружающей средой.

Увеличение внутренней энергии (температуры) при изохорном процессе происходит за счет подведенной теплоты, а при адиабатном

процессе за счет совершения работы внешними телами над газом.

При изотермическом процессе не происходит изменение внутренней энергии $\Delta U = \Delta T = 0$:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i}{2} \Delta(pV) = 0$$

Следовательно, $\Delta U = \Delta T = \Delta(pV) = 0$. Уравнение первого закона термодинамики принимает вид:

$$Q = A' = -A.$$

Теплота, подведенная к системе, расходуется на совершение работы системой над внешними телами. Совершение работы внешних тел над системой ($A > 0$, $A' < 0$) требует отведение теплоты от системы ($Q < 0$) для неизменности температуры и внутренней энергии.

При изобарном процессе ($p = \text{const}$) увеличение температуры ($\Delta U > 0$) требует увеличения объема ($A' > 0$) и согласно уравнению первого закона термодинамики, происходит за счет подвода теплоты ($Q > 0$). Уравнение первого закона термодинамики сохраняет первоначальный вид:

$$Q = \Delta U + A',$$

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i}{2} p \Delta V$$

$$A' = p \Delta V,$$

$$Q = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T + p \Delta V$$

$$Q = \frac{i}{2} p \Delta V + p \Delta V = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) p \Delta V$$

Для одноатомного газа принимает вид:

$$Q = \frac{3}{2} p \Delta V + p \Delta V = \left(\frac{3}{2} + 1 \right) p \Delta V = 2,5 p \Delta V$$

Задача В4 [2, стр. 47]

Решение

График на диаграмме pV похож на изотерму. По закону Бойля - Мариотта

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Отсюда

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2}$$

во сколько раз увеличится давление, во столько раз уменьшится объем. По графику видно, что давление увеличилось в 4 раза за счет уменьшения объема в 4 раза, поэтому на графике изображена изотерма.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа не изменилась $\Delta U=0$. Согласно первому закону термодинамики теплота, подведенная к газу Q должна израсходоваться на совершение работы над внешними телами A' :

$$Q = A'.$$

Работа внешних сил A , совершенная над газом

$$A = -A'.$$

$$Q = -A.$$

Отсюда

$$A = -Q$$

По условию газ передал теплоту окружающей среде $Q = -25$ кДж, поэтому

$$A = -(-25) = 25 \text{ кДж.}$$

Работа внешних сил не увеличивающая внутреннюю энергию газа

расходуется по закону сохранения энергии на нагрев окружающего пространства.

Ответ: 25 кДж.

Задача С2 [2, стр.].

Дано: $\nu = 1$ моль; $T_1 = T_2 = 300$ К; $p_2 = 3p_3$. $Q_{2,3} - ?$

Решение

Через участок 2-3 на графике проходит прямая (изображена пунктиром), проходящая также и через начало координат, поэтому являющаяся изохорой. При неизменном объеме работа газа не совершается, поэтому в соответствии с первым законом термодинамики

$$Q = \Delta U,$$

де Q — теплота, подведенная к газу, Дж;

ΔU – изменение внутренней энергии газа, Дж.

Определим изменение внутренней энергии одноатомного газа по формуле

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T,$$

где $\frac{m}{M} = \nu$ - количество вещества, моль;

R – молярная газовая постоянная, $R \approx 8,31$ Дж/(моль·К);

ΔT – изменение абсолютной температуры газа, К.

На участке 2-3 изменение абсолютной температуры

$$\Delta T = T_3 - T_2$$

Получаем формулу определения теплоты, подведенной к газу

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_2)$$

Определим T_3 , используя уравнение изохорного закона

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}$$

$$T_3 = \frac{p_3}{p_2} T_2$$

$$T_3 = \frac{p_3}{3p_3} T_2 = \frac{T_2}{3} = \frac{300\text{K}}{3} = 100\text{K}$$

Подставляем в формулу теплоты, подведенной к газу

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot 8,31 \cdot (100 - 300) = \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot 8,31 \cdot (-200) = -2493 \text{ Дж.}$$

Минус указывает на обратное действие подведению к газу теплоты — газ отдает теплоту при уменьшении давления по изохорному закону.

Проверим размерность

$$[Q] = [\Delta U] = \left[\text{моль} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}} \cdot \text{K} \right] = [\text{Дж}].$$

Ответ: газ отдал 2493 Дж теплоты.

Задача С3 [2, стр. 48].

Дано: Неон, $V_1 < V_2$; $T_1 = T_2$; $V_2 < V_3$; $Q_2 = Q_3$; $T_1 = 2T_3$; $A' = 10 \text{ Дж}$; $p_1 = 1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$; $V_1 = 3 \text{ дм}^3 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. $Q - ?$

Решение

Процесс 1 - 2 изотермический, поэтому внутренняя энергия не изменилась. В соответствии с первым законом термодинамики теплота, полученная газом Q_{1-2} расходуется на совершение газом работы A_{1-2}' над внешними телами:

$$Q_{1-2} = A_{1-2}'$$

Процесс 2 - 3 адиабатный, поэтому теплота к газу не подводится:

$$Q_{2-3} = 0 = \Delta U_{2-3} + A_{2-3}'$$

где ΔU_{2-3} - изменение внутренней энергии, Дж;

A_{2-3}' - работа газа над внешними телами, Дж.

Теплота, полученная газом за весь процесс равна теплоте, полученной газом в процессе 1 - 2.

$$Q = Q_{1-2} = A_{1-2}'$$

Известна работа A' , совершенная газом за весь процесс, поэтому если найдем работу, совершенную газом в процессе 2 - 3, то сможем определить A_{1-2}' :

$$A_{1-2}' = A' - A_{2-3}'$$

Работа, совершенна газом в процессе 2 - 3

$$A_{2-3}' = -\Delta U_{2-3}$$

Изменение внутренней энергии в процессе 2 - 3

$$\Delta U_{2-3} = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$$

где $\frac{m}{M} = \nu$ - количество вещества, моль;

R – молярная газовая постоянная, $R \approx 8,31$ Дж/(моль·К);

ΔT – изменение абсолютной температуры газа, К.

В процессе 2-3 изменение абсолютной температуры

$$\Delta T = T_3 - T_2$$

Получаем формулу определения теплоты, подведенной к газу в процессе 2 - 3

$$\Delta U_{2-3} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_2) = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_1) = \frac{3}{2} \nu R \left(\frac{T_1}{2} - T_1 \right) = \frac{3}{2} \nu R T_1 \left(\frac{1}{2} - 1 \right) =$$

$$= \frac{3}{2} \nu RT_1 \frac{1-2}{2} = -\frac{3}{4} \nu RT_1$$

Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона для состояния 1

$$p_1 V_1 = \frac{m}{M} RT_1,$$

отсюда

$$\nu RT_1 = p_1 V_1.$$

Тогда

$$\Delta U_{2-3} = -\frac{3}{4} \nu RT_1 = -\frac{3}{4} p_1 V_1$$

Работа, совершена газом в процессе 2 - 3

$$A_{2-3}' = -\Delta U_{2-3} = -\left(-\frac{3}{4} p_1 V_1\right) = \frac{3}{4} p_1 V_1$$

Теплота, полученная газом за весь процесс

$$Q = A_{1-2}' = A' - A_{2-3}' = A' - \frac{3}{4} p_1 V_1$$

Подставляем

$$Q = 10 - \frac{3}{4} \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 10 - \frac{3}{4} \cdot 3 = 10 - \frac{9}{4} = 10 - 2,25 = 7,75 \text{ Дж}$$

Проверка размерности

$$[Q] = [\text{Дж} - \text{Па} \cdot \text{м}^3] = \left[\text{Дж} - \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 \right] = [\text{Дж} - \text{Нм}] = [\text{Дж}]$$

Ответ: за весь процесс газом было получено $Q = 7,75$ Дж теплоты.

Задача С4 [2, стр. 48].

Дано: идеальный одноатомный газ; $p_1 = 3 \cdot 10^5$ Па; $\ell = 0,2$ м; $S = 25 \text{ см}^2 = 25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $x = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $F_{\text{тр}} = 2 \text{ кН}$. Q - ?

Решение

Теплота, полученная газом, израсходовалась на увеличение его внутренней энергии (температуры) и на совершение газом работы над внешними телами (преодоление сил трения):

$$Q = \Delta U + A', \quad (1)$$

где Q — теплота, подведенная к газу, Дж;

ΔU – изменение внутренней энергии газа, Дж;

A' – работа, совершенная газом над внешними телами, Дж.

Газ совершает работу по преодолению сил трения

$$A' = F_{\text{тр}}x.$$

Первоначальный объем газа

$$V_1 = S\ell,$$

конечный объем газа

$$V_2 = S(\ell + x).$$

Согласно уравнения Менделеева-Клапейрона

$$p_1V_1 = \nu RT_1$$

$$p_2V_2 = \nu RT_2$$

$$\nu RT_2 - \nu RT_1 = p_2V_2 - p_1V_1$$

$$\nu R\Delta T = p_2V_2 - p_1V_1$$

$$\Delta T = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{\nu R}$$

Изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R\Delta T$$

Поставляем ΔT

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\nu R} = \frac{3}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

Поставляем в (1) ΔU и A'

$$Q = \frac{3}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) + F_{TP} x \quad (2)$$

Медленный нагрев газа исключает появление значительного ускорения поршня, поэтому силами инерции можно пренебречь. В момент, когда поршень начнет двигаться на поршень будет действовать неизменная сила давления, равная силе трения

$$p_2 S = F_{TP}$$

Отсюда определим давление

$$p_2 = \frac{F_{TP}}{S} = \frac{2 \cdot 10^3 \text{ Н}}{25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Подставляем во (2) p_2 , V_2 и V_1

$$Q = \frac{3}{2} \left(\frac{F_{TP}}{S} \cdot S(\ell + x) - p_1 S \ell \right) + F_{TP} x$$

$$Q = \frac{3}{2} (F_{TP}(\ell + x) - p_1 S \ell) + F_{TP} x$$

$$Q = -\frac{3}{2} p_1 S \ell + \frac{3}{2} F_{TP}(\ell + x) + F_{TP} x$$

$$Q = -\frac{3}{2} p_1 S \ell + F_{TP} \left(\frac{3}{2} \ell + \frac{3}{2} x + x \right)$$

$$Q = -\frac{3}{2} p_1 S \ell + F_{TP} \left(\frac{3}{2} \ell + \frac{5}{2} x \right)$$

$$Q = -\frac{3}{2} \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2 + 2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot 0,2 + \frac{5}{2} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \right) = 625 \text{ Дж}$$

$$[Q] = \left[\frac{H}{m^2} \cdot m^2 \cdot m + H \cdot (m + m) \right] = [Hm] = [\text{Дж}]$$

Ответ: газ получил $Q = 625$ Дж.

1.4. Кипение воды

При понижении давления температура кипения воды уменьшается. При значительном понижении давления вода закипит при комнатной температуре.

1.5. Конденсация пара

При понижении температуры пара, например, впрыскиванием холодной воды в замкнутом объеме в соответствии с изохорным газовым законом

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

должно понизиться давление пара и температура конденсации воды. Для реальных газов понижение давления приводит к понижению температуры, которое в свою очередь опять понижает температуру. Процесс продолжается до начала конденсации пара. Сконденсированный пар (вода) занимает в 1700 раз меньший объем по сравнению с паром. Это приводит к резкому понижению давления и температуры в замкнутом объеме. Весь пар мгновенно конденсируется, образуется вакуум. Атмосферного давления оказывается достаточно для смятия

железнодорожной цистерны с толщиной металлических стенок 1 см.

Задача. Насыщенный пар под давлением $20 \cdot 10^5$ Па занимал объем 1 литр при температуре $t = 500$ °С. После впрыскивания холодной воды произошла конденсация пара. Какое давление при неизменном объеме установилось после конденсации воды?

Решение

До момента конденсации происходил изохорный газовый процесс

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

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

В первом приближении будем считать, что конденсация происходит при температуре $t_2 = 100$ °С.

$p_1 =$	20	$\cdot 10^5$	Па	=	20	атм				
$t_1 =$	500	°С								
$T_1 =$	$t_1 +$	273	=	500	+	273	=	773	К	
$t_2 =$	100	°С								
$T_2 =$	$t_2 +$	273	=	100	+	273	=	373	К	
$p_2 =$	p_1	T_2	=	$20 \cdot 10^5$	$\frac{373}{773}$	=	$9,65 \cdot 10^5$	Па =	9,65	атм
	T_1				773					

После конденсации плотность воды увеличилась в 1700 раз, а объем сосуда V остался неизменным.

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

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

Объем, занимаемый водой уменьшается в 1700 раз, поэтому в сосуде образуется вакуум.

1.6. Относительная влажность воздуха

Давление p_n и плотность ρ_n насыщенного водяного пара возрастают с ростом температуры воздуха и уменьшаются при охлаждении воздуха (p_n , ρ_n и температура (t или T) изменяются одинаково). Это значит, что более горячий воздух способен удержать больше паров воды. Поэтому, если водяной пар при некоторой температуре воздуха не насыщенный, то при охлаждении воздуха, содержащейся в нем воды, оказывается достаточно для насыщения при более низкой температуре (точка росы). Это объясняет выпадение росы по утрам или появление капель воды на холодных предметах: водяные пары становятся перенасыщенными при более низкой температуре, воздух оказывается не способен удержать такое количество воды и лишнее ее количество выпадает в виде осадков. С другой стороны если при некоторой температуре водяной пар насыщен, то при нагреве воздуха он становится уже не насыщенным.

Абсолютная влажность воздуха ρ_a — это плотность водяного пара, г/м³. Абсолютная влажность показывает сколько граммов водяного пара

содержится в кубометре воздуха. Плотность насыщенного водяного пара ρ_n — это максимально возможная плотность водяного пара при данной температуре. Она показывает сколько граммов водяного пара может содержаться в кубометре воздуха при данной температуре. Относительная влажность воздуха:

$$\varphi = \frac{P_a}{P_n} \cdot 100\%$$

В метеорологии

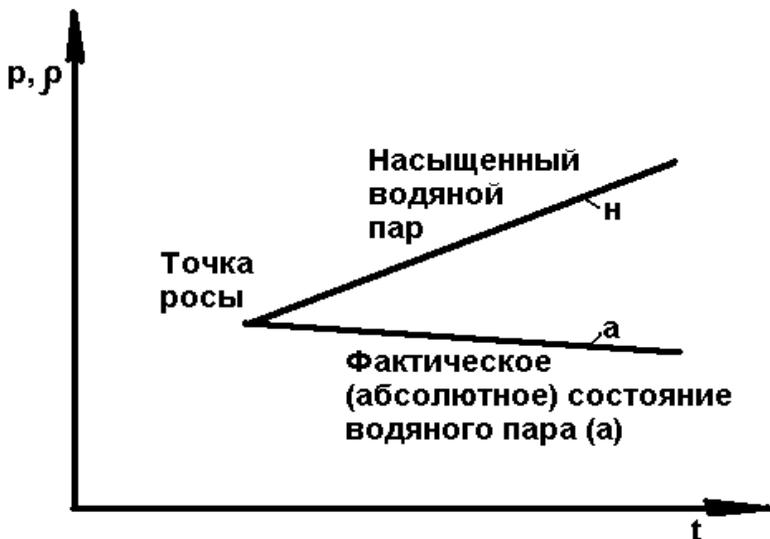
$$\varphi = \frac{P_a}{P_n} \cdot 100\%$$

где p_a — фактическое давление водяного пара, гПа (гектопаскаль, гПа = 100 Па);

p_n — давление насыщенного водяного пара при данной температуре, гПа.

Плотность насыщенного водяного пара ρ_n изменяется вместе с температурой воздуха, они растут и уменьшаются одновременно. При нагреве и охлаждении воздуха фактическая плотность водяного пара ρ_a остается неизменной, если ρ_a не превысит ρ_n и вода не выпадет в виде осадков (при выпадении осадков ρ_a уменьшится). Если при какой-то температуре относительная влажность воздуха менее 100% (фактическая плотность водяного пара $\rho_a <$ плотности насыщенного водяного пара ρ_n при данной температуре), то при охлаждении воздуха плотность насыщенного водяного пара ρ_n уменьшается и становится равной фактической плотности водяного пара ρ_a , водяной пар становится насыщенным $\rho_a = \rho_n$ и $\varphi = 100\%$ (точка росы). При дальнейшем

охлаждении воздуха водяной пар становится перенасыщенным и вода конденсируется. Нагрев воздуха увеличивает плотность насыщенного водяного пара ρ_n , фактическая плотность водяного пара ρ_a остается неизменной, поэтому $\rho_a < \rho_n$ и $\varphi < 100\%$.



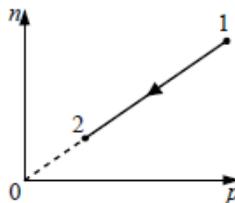
Чем меньше фактическая плотность водяного пара ρ_a и относительная влажность воздуха φ , тем меньше и температура воздуха при которой вода начинает конденсироваться (пар насыщен при $\rho_a = \rho_n$ и $\varphi = 100\%$).

Изменение давления окружающего воздуха не влияет на ρ_n и ρ_n , которые зависят лишь от температуры (t или T).

1.7. Решение задач по МКТ и термодинамике

A8 [8].

При переводе идеального газа из состояния 1 в состояние 2 концентрация молекул n пропорциональна давлению p (см. рисунок). Масса газа в процессе остаётся постоянной. Утверждается, что в данном процессе
 А. плотность газа возрастает.
 Б. происходит изотермическое расширение газа.
 Из этих утверждений



- 1) верно только А
- 2) верно только Б
- 3) оба утверждения верны
- 4) оба утверждения неверны

Решение

Давление

$$p = nkT,$$

где n – концентрация молекул, м^{-3} ;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура, К.

Отсюда зависимость $n=f(p)$, задающая прямую пропорциональность на графике будет описываться уравнением

$$n = \frac{1}{kT} p.$$

Для прямой угловой коэффициент является постоянной

$$\frac{1}{kT} = \text{const}$$

Отсюда $T = \text{const}$, процесс изотермический, следовательно

$$pV = \text{const}.$$

По условию задачи из графика видно, что происходит уменьшение давления, следовательно объем увеличивается, то есть происходит изотермическое расширение газа.

Плотность

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

По условию масса не меняется, поэтому увеличение объема сопровождается уменьшением плотности.

Ответ: 2) верно только Б (происходит изотермическое расширение газа).

Задача. За какое время нагреватель мощностью 920 Вт превратит в пар 1 кг воды, имеющей температуру 100°C при КПД = 80% [9]?

Решение

Теплота, требующаяся для превращения в пар 1 кг воды:

$$Q = \lambda m$$

$$P = \frac{A}{t}$$

$$A = Pt$$

$$\text{КПД} = \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{затраченная}}}$$

$$\text{КПД} = \frac{Q}{A}$$

$$\text{КПД} = \frac{Lm}{Pt}$$

$$t = \frac{Lm}{P \cdot \text{КПД}} = \frac{2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 1 \text{ кг}}{920 \text{ Вт} \cdot 0,8} = \frac{2,3 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{920 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \cdot 0,8} = 3125 \text{ с} = 52,08(3) \text{ мин}$$

2. Перевод единиц измерения

$1 \text{ эВ} = 1,602176487(40) \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ (заряд электрона отрицательный и заряд протона положительный).

Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ 1 фут (международный (США) или русский) = 0,3048 метров /Сл5/.

3. Список литературы

1. Физика11

2. Фадеева

3. ЕГЭ Физика 2013 Демо.

4. ГИА 9.

5. Википедия. URL: <http://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 23.05.2010).

6. Сборник задач по физике. 7-9 классы: пособие для учащихся общеобразоват. Учреждений / В. И. Лукашик, Е. В. Иванова. - М.: Просвещение, 2011. - 240 с.

7. Бальва О.П. ЕГЭ. Физика — М.: 2013.

8. ЕГЭ Физика 2014 Демо.

9. Физика. 10 класс : дидактические материалы / А. Е. Марон, Е.А. Марон - М.: Дрофа, 2005. - 156 с.

super-code.ru

super-code.ru

Сайт: www.super-code.ru e-mail: da.irk.ru@mail.ru

Skype: [da.irk.ru](https://www.skype.com/people/da.irk.ru)

Опубликовано 16.05.17