

Сегодня: понедельник, 1 июня 2020 г.

Молекулярная физика и термодинамика



Мельникова Тамара Николаевна
ст. преподаватель ОЭФ ИЯТШ ТПУ

Законы идеальных газов

В XVII – XIX веках были сформулированы опытные законы идеальных газов, которые подробно изучаются в школьном курсе физики. Кратко напомним их.

Изопроцессы идеального газа – процессы, при которых один из параметров остаётся неизменным. Кроме того, во всех изопроцессах постоянной берется **масса** вещества.

1. Изотермический процесс. $T = \text{const}$.

Изотермическим процессом называется процесс, протекающий при постоянной температуре T .

Поведение идеального газа при изотермическом процессе подчиняется ***закону Бойля-Мариотта:***

$$***PV = \text{const}***$$

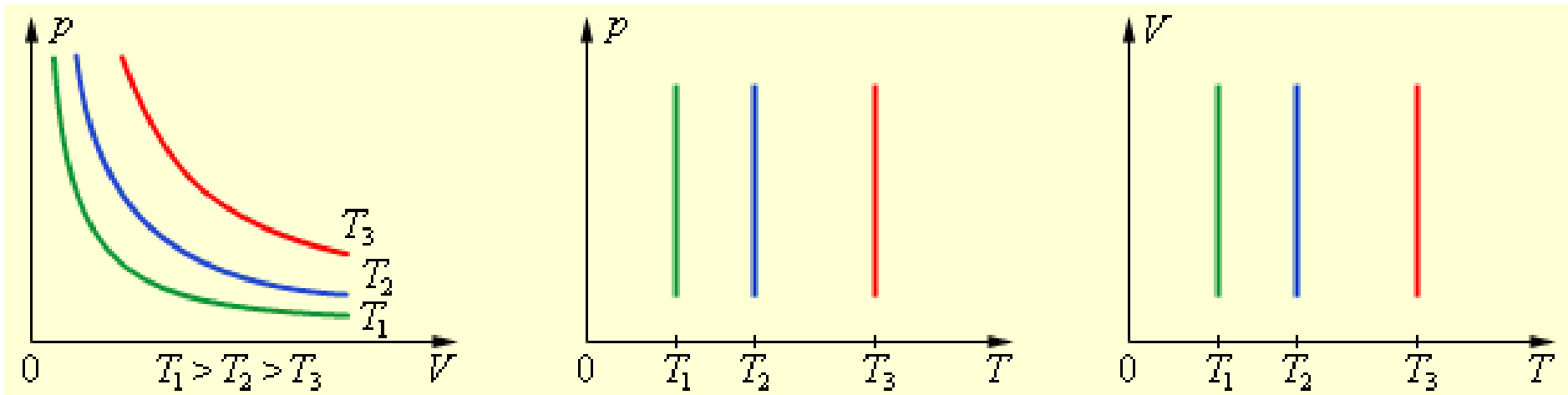
«При постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, произведение объёма газа на его давление остаётся ПОСТОЯННЫМ».

График изотермического процесса на pV – диаграмме называется ***изотермой***.

На рисунке приведены графики изотермического процесса на $V T$ и $p T$ диаграммах.

Уравнение изотермы

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$



2. Изобарический процесс. $p = \text{const.}$

Изобарическим процессом называется процесс, протекающий при постоянном давлении p .

Поведение газа при изобарическом процессе подчиняется закону Гей-Люссака:

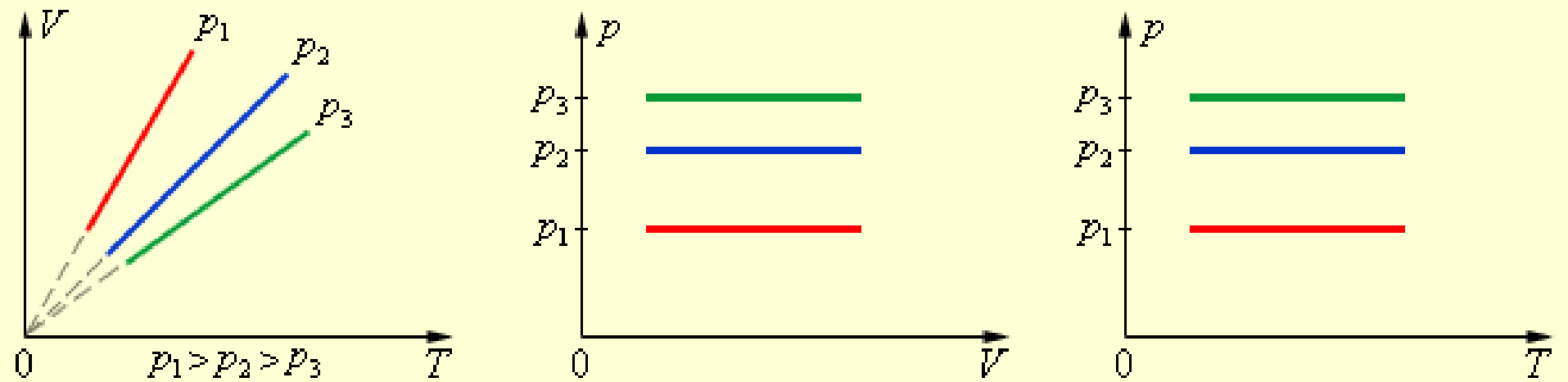
$$\frac{V}{T} = \text{const.}$$

«При постоянном давлении и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, отношение объёма газа к его абсолютной температуре остаётся ПОСТОЯННЫМ».

График изобарического процесса на V T диаграмме называется **изобарой**. Графики изобарического процесса на p V и p T диаграммах приведены на рисунке.

Уравнение изобары:

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



3. Изохорический процесс. $m = \text{const}$, $V = \text{const}$.

Изохорическим процессом называется процесс, протекающий при постоянном объёме V .

Поведение газа при этом изохорическом процессе подчиняется **закону Шарля:**

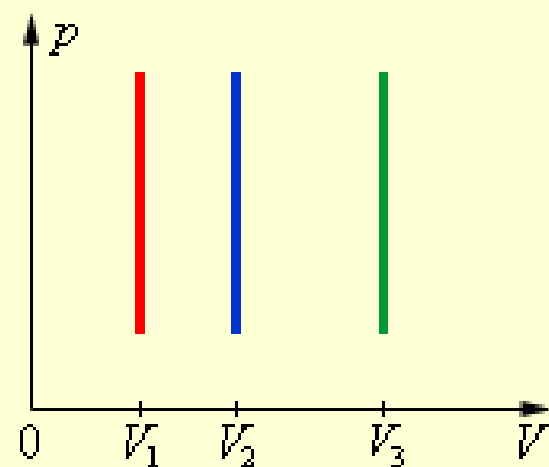
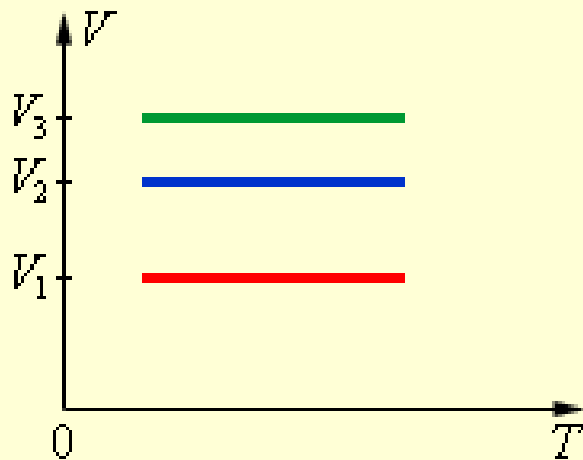
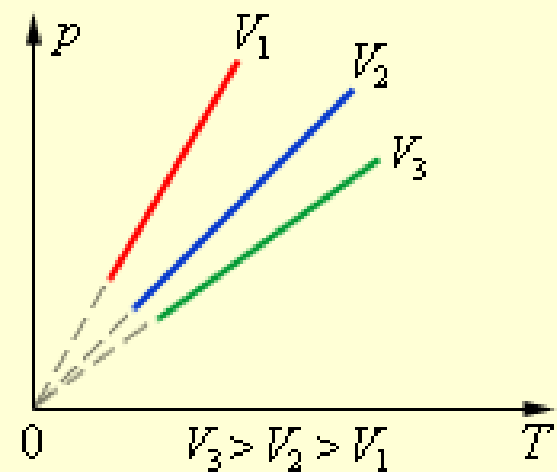
$$\frac{p}{T} = \text{const.}$$

«При постоянном объёме и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, отношение давления газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным».

График изохорического процесса на PV диаграмме называется ***изохорой***. Графики изохорического процесса на PT и VT диаграммах представлены на рисунке

Уравнение изохоры:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}.$$



4. *Адиабатический процесс* (изоэнтروпийный).

Процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

$$Q = 0.$$

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

6. Закон Авогадро

При одинаковых давлениях и одинаковых температурах, в равных объёмах различных идеальных газов содержится одинаковое число молекул.

В одном моле различных веществ содержится

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

молекул (число Авогадро).

7. Закон Дальтона

Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений p , входящих в неё газов

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

(p_n – давление, которое оказывал бы определённый газ из смеси, если бы он занимал весь объём).

8. *Объединённый газовый закон* (Закон Клапейрона).

В соответствии с законами Бойля-Мариотта и Гей-Люссака можно сделать заключение, что для данной массы газа

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{pV}{T} = \text{const.}$$

Это объединённый газовый закон Клапейрона.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона)

Менделеев объединил законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля с законом Авогадро:

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

здесь $\frac{m}{\mu} = \nu$ — число молей.

Если обозначим $\frac{m}{V} = \rho$ – плотность газа, то

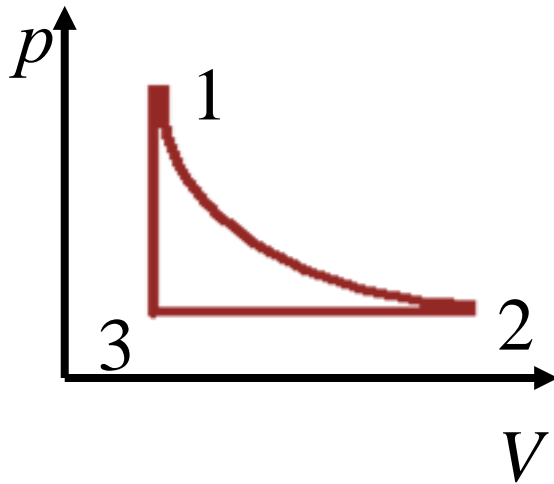
$$P = \frac{m}{\mu V} RT = \frac{\rho}{\mu} RT.$$

Если рассматривать *смесь газов*, заполняющих объём V при температуре T , тогда, парциальные давления, можно найти, как:

$$P_1 = \frac{m_1 RT}{\mu_1 V}, \quad P_2 = \frac{m_2 RT}{\mu_2 V}, \quad \dots, \quad P_n = \frac{m_n RT}{\mu_n V}$$

Решение задач по переносу графиков изопрцесса из одних осей координат в другие:

1 этап – описание изопрцессов происходящих с
газом



1 - 2 $T - \text{const} \Rightarrow V \uparrow p \downarrow; pV = \text{const}$

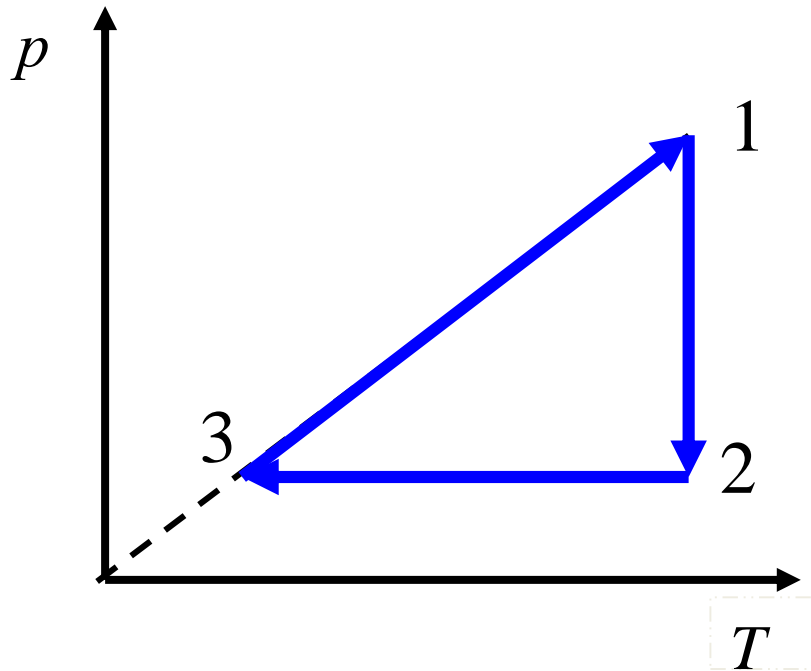
2 - 3 $p - \text{const} \Rightarrow V \downarrow T \downarrow; V/T = \text{const}$

3 - 1 $V - \text{const} \Rightarrow p \uparrow T \uparrow; p/T = \text{const}$

Перейдем к pT - координатам.

2 – этап

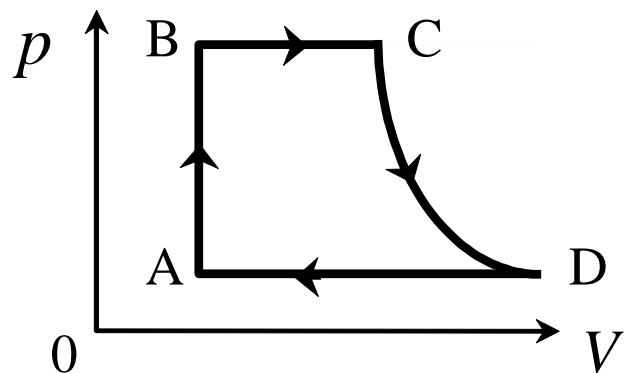
$V - \text{const}$

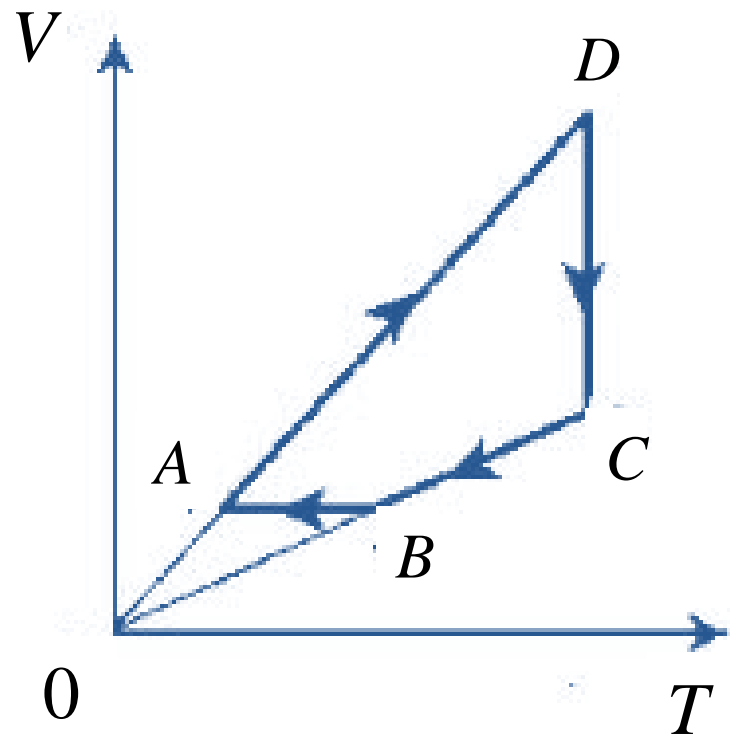


Каждый следующий график начинаем строить с участка постоянной величины для данных осей координат

Задача 1

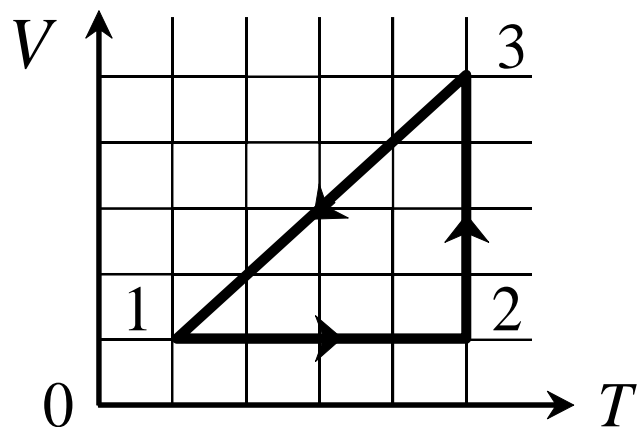
На p – V диаграмме показан цикл тепловой машины, рабочим телом которой является идеальный газ (рис.). Участок CD соответствует изотерме. Изобразите этот процесс в координатах V , T .





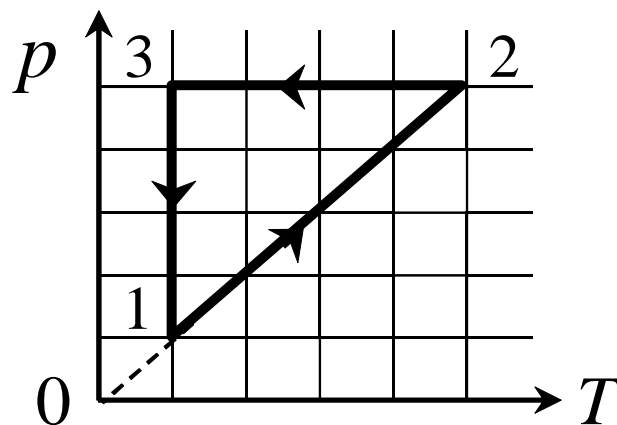
Задача 2

На $V-T$ диаграмме показан цикл тепловой машины, рабочим телом которой является идеальный газ (рис.). Изобразите этот процесс в координатах p, V .



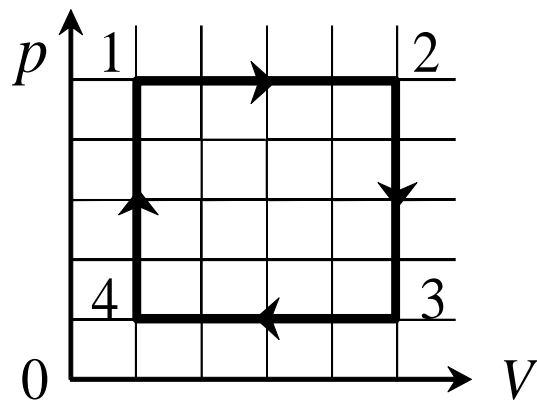
Задача 3

На p – T диаграмме показан цикл тепловой машины, рабочим телом которой является идеальный газ (рис.). Изобразите этот процесс в координатах V , T .



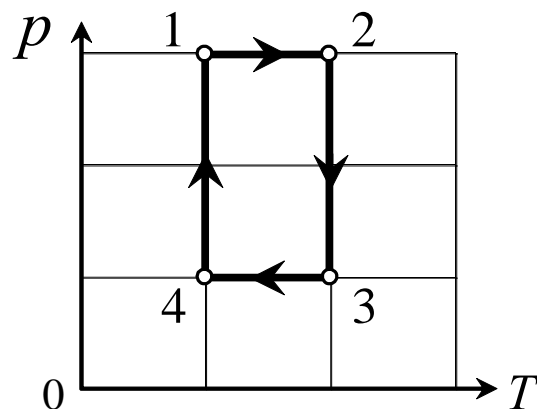
Задача 4

На p - V диаграмме показан цикл тепловой машины, рабочим телом которой является идеальный газ (рис.). Изобразите этот процесс в координатах V , T .



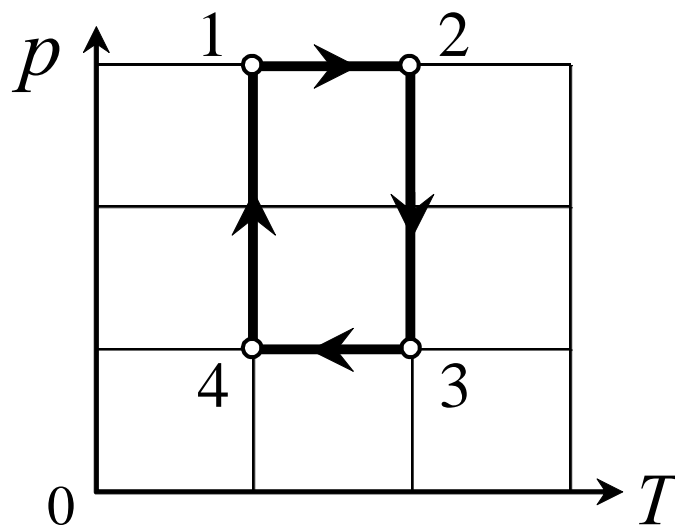
Задача 5

На p – T диаграмме показан цикл тепловой машины, у которой рабочим телом является идеальный газ (рис.). Изобразите этот процесс в координатах p , V .



Задача 6

На pT – диаграмме показан цикл тепловой машины, у которой рабочим телом является идеальный газ (рис.). На каком из участков цикла 1–2, 2–3, 3–4, 4–1 работа газа наибольшая по модулю? Ответ обоснуйте.



[2–3]

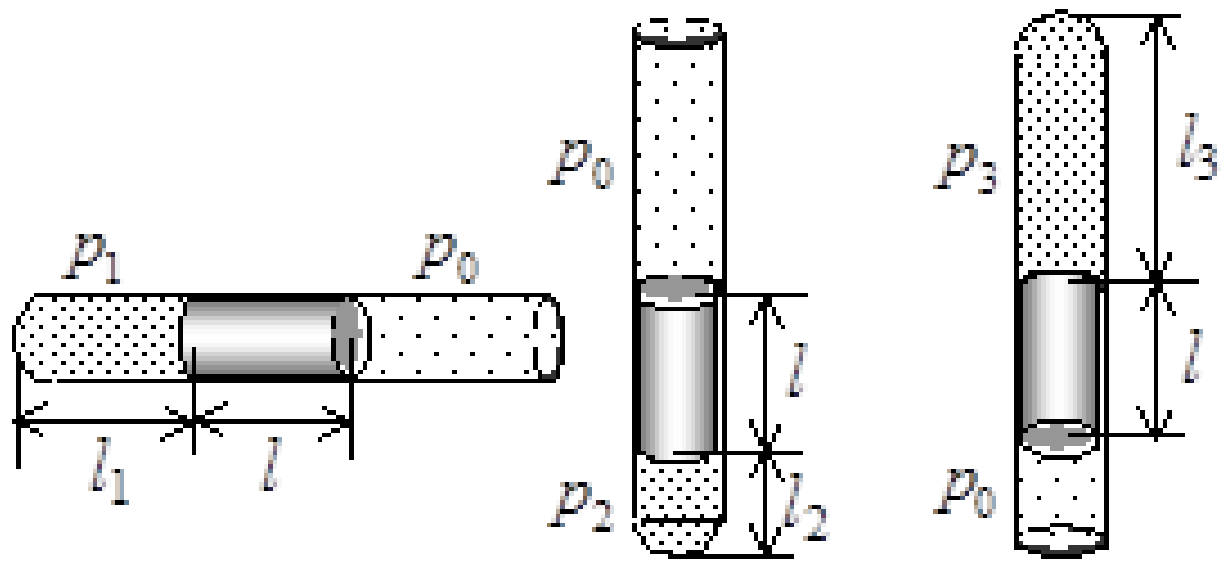
Задача 7

В запаянной с одного конца узкой запаянной трубке, расположенной горизонтально, находится столбик воздуха длиной $l_1 = 30,7$ см, запертый столбиком ртути длиной $l = 21,6$ см.

Какой будет длина столбика воздуха, если трубку поставить вертикально: отверстием вверх, отверстием вниз?

Ответ представьте в сантиметрах и округлите до десятых.

[43,5 см]



Решение.

Найдем объем V_i воздуха в закрытой части трубки и его давление p_i , а также длину l_i столбика воздуха в закрытой части трубки для трех её положений (рис.): В горизонтальном положении

$$V_1 = l_1 S, \quad p_1 = p_0, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения трубки.

Трубка расположена отверстием вертикально вверх

$$V_2 = l_2 S, \quad p_2 = p_0 + \rho g l. \quad (2)$$

Поскольку масса и температура не изменяются, по закону Бойля – Мариотта ($pV = \text{const}$) из (1) и (2), получим:

$$p_0 l_1 S = (p_0 + \rho g l) l_2 S; \quad l_2 = \frac{p_0 l_1}{p_0 + \rho g l} \approx 23,7 \text{ см}$$

Трубка расположена отверстием вниз

$$V_3 = l_3 S, \quad p_3 = p_0 - \rho g l. \quad (3)$$

Из (3), аналогично пункту 2, найдем:

$$p_0 l_1 S = (p_0 - \rho g l) l_3 S; \quad l_3 = \frac{p_0 l_1}{p_0 - \rho g l} \approx 43,5 \text{ см}$$

Задача 8 С4.

Вертикальная цилиндрическая трубка с запаянными концами разделена на две части тонким горизонтальным поршнем, способным перемещаться вдоль нее без трения. Верхняя часть трубки заполнена неоном, а нижняя – гелием, причем массы газов одинаковы. При некоторой температуре поршень находится точно посередине трубки. После того, как трубку нагрели, поршень переместился вверх и стал делить объем трубки в отношении 1:3.

Определите, во сколько раз возросла абсолютная температура газов.

[3]

Решение. Первый случай.

$$\frac{2mRT_1}{VM_1} = \frac{2mRT_1}{VM_2} + \frac{mg}{S}. \quad (1)$$

$$\frac{mg}{S} = \frac{2mRT_1}{V} \cdot \frac{M_2 - M_1}{M_1M_2}. \quad (2)$$

Второй случай.

$$\frac{4mRT_2}{VM_1} = \frac{4mRT_2}{3VM_2} + \frac{mg}{S}. \quad (3)$$

$$\frac{mg}{S} = \frac{4mRT_2}{V} \cdot \frac{3M_2 - M_1}{3M_1M_2}. \quad (4)$$

Отсюда

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{M_2 - M_1}{3M_2 - M_1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{M_1 - M_2}{M_1 - 3M_2} = 3.$$

Задача 9 С4.

Цилиндрический сосуд расположен горизонтально и разделен на две части поршнем площадью $S = 10 \text{ см}^2$, прикрепленным к левому торцу сосуда пружиной $k = 2 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$. Вначале в обеих частях сосуда находится воздух при атмосферном давлении $p_0 = 10^5 \text{ Па}$, при этом пружина не деформирована и имеет длину $l_0 = 20 \text{ см}$. Затем весь воздух из правой части сосуда откачивают.

Найдите энергию, запасенную в пружине после откачки, если температура в левой части сосуда не изменилась.

[1,7 Дж]

Решение. По закону Бойля–Мариотта

$$p_0 l_0 S = p(l_0 + x)S \quad (1)$$

Поскольку поршень находится в равновесии

$$pS = kx \quad (2)$$

Решая полученную систему уравнений относительно x и подставив в формулу для потенциальной энергии деформации пружины, получим

$$W = \frac{k}{2} \left(-\frac{l_0}{2} + \sqrt{\frac{l_0^2}{4} + \frac{p_0 l_0 S}{k}} \right)^2 = 1,7 \text{ Дж.}$$

Задача 11

В колбе вместимостью $V = 0,5$ л находится кислород при нормальных условиях.

Определить среднюю энергию поступательного движения всех молекул, содержащихся в колбе.



Задача 12

Во сколько, раз средняя квадратичная скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ молекул кислорода больше средней квадратичной скорости пылинки массой $m = 10^{-8}$ г, находящейся среди молекул кислорода?

[в $1,37 \cdot 10^7$ раз]

Задача 13

При какой температуре T средняя квадратичная скорость атомов гелия станет равной второй космической скорости $v_2 = 11,2$ км/с?

$$[p = 20,1 \text{ кК}]$$