



Волгоградский государственный
социально-педагогический университет

Задачи ЕГЭ и олимпиад по молекулярной физике и термодинамике



Глазов Сергей Юрьевич, доктор
физико-математических наук,
профессор, кафедра высшей
математики и физики ВГСПУ

26 декабря 2020 г

2	МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА	2.1.13	Насыщенные и ненасыщенные пары. Качественная зависимость плотности и давления насыщенного пара от температуры, их независимость от объема насыщенного пара
2.1	МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	2.1.14	Влажность воздуха. Относительная влажность: $\varphi = \frac{p_{\text{пара}}(T)}{p_{\text{насыщ. пара}}(T)} = \frac{\rho_{\text{пара}}(T)}{\rho_{\text{насыщ. пара}}(T)}$
2.1.1	Модели строения газов, жидкостей и твердых тел	2.1.15	Изменение агрегатных состояний вещества: испарение и конденсация, кипение жидкости
2.1.2	Тепловое движение атомов и молекул вещества	2.1.16	Изменение агрегатных состояний вещества: плавление и кристаллизация
2.1.3	Взаимодействие частиц вещества	2.1.17	Преобразование энергии в фазовых переходах
2.1.4	Диффузия. Броуновское движение	2.2	ТЕРМОДИНАМИКА
2.1.5	Модель идеального газа в МКТ: частицы газа движутся хаотически и не взаимодействуют друг с другом	2.2.1	Тепловое равновесие и температура
2.1.6	Связь между давлением и средней кинетической энергией поступательного теплового движения молекул идеального газа (основное уравнение МКТ): $p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \cdot \left(\frac{m_0 v^2}{2} \right) = \frac{2}{3} n \cdot \overline{\varepsilon_{\text{пост}}}$	2.2.2	Внутренняя энергия
2.1.7	Абсолютная температура: $T = t^\circ + 273 \text{ К}$	2.2.3	Теплопередача как способ изменения внутренней энергии без совершения работы. Конвекция, теплопроводность, излучение
2.1.8	Связь температуры газа со средней кинетической энергией поступательного теплового движения его частиц: $\overline{\varepsilon_{\text{пост}}} = \left(\frac{m_0 v^2}{2} \right) = \frac{3}{2} kT$	2.2.4	Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества c : $Q = cm\Delta T$
2.1.9	Уравнение $p = nkT$	2.2.5	Удельная теплота парообразования r : $Q = rm$ Удельная теплота плавления λ : $Q = \lambda m$ Удельная теплота сгорания топлива q : $Q = qm$
2.1.10	Модель идеального газа в термодинамике: { Уравнение Менделеева – Клапейрона { Выражение для внутренней энергии Уравнение Менделеева – Клапейрона (применимые формы записи): $pV = \frac{m}{\mu} RT = \nu RT = NkT, \quad p = \frac{\rho RT}{\mu}$ Выражение для внутренней энергии одноатомного идеального газа (применимые формы записи): $U = \frac{3}{2} \nu RT = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT = \nu c_V T = \frac{3}{2} pV$	2.2.6	Элементарная работа в термодинамике: $A = p\Delta V$ Вычисление работы по графику процесса на pV -диаграмме
2.1.11	Закон Дальтона для давления смеси разреженных газов: $p = p_1 + p_2 + \dots$	2.2.7	Первый закон термодинамики: $Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12} = (U_2 - U_1) + A_{12}$ Адиабата: $Q_{12} = 0 \Rightarrow A_{12} = U_1 - U_2$
2.1.12	Изопроцессы в разреженном газе с постоянным числом частиц N (с постоянным количеством вещества ν): изотерма ($T = \text{const}$): $pV = \text{const}$, изохора ($V = \text{const}$): $\frac{p}{T} = \text{const}$ изобара ($p = \text{const}$): $\frac{V}{T} = \text{const}$, Графическое представление изопроцессов на pV -, pT - и VT - диаграммах	2.2.8	Второй закон термодинамики, необратимость
		2.2.9	Принципы действия тепловых машин. КПД: $\eta = \frac{A_{\text{за цикл}}}{Q_{\text{нагр}}} = \frac{Q_{\text{нагр}} - Q_{\text{хол}} }{Q_{\text{нагр}}} = 1 - \frac{ Q_{\text{хол}} }{Q_{\text{нагр}}}$
		2.2.10	Максимальное значение КПД. Цикл Карно $\max \eta = \eta_{\text{Карно}} = \frac{T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}} = 1 - \frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}}$
		2.2.11	Уравнение теплового баланса: $Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0$

Уравнение Менделеева-Клапейрона

Задача 1: Сосуд объемом $V_1 = 50$ л соединен с сосудом объемом $V_2 = 18$ л с помощью короткой трубки, в которой есть специальный клапан, позволяющий газу переходить из большого сосуда в малый, если разность давления в сосудах превышает $\Delta p = 1,1 \cdot 10^5$ Па. В большом сосуде находится газ при давлении $p_0 = 10^5$ Па и температуре $T_0 = 300$ К, в малом сосуде - вакуум. Каким будет давление в малом сосуде, если систему нагреть до температуры $t = 167^\circ\text{C}$?

Дано:

$$\begin{aligned} V_1 &= 50 \text{ л} \\ V_2 &= 18 \text{ л} \\ \Delta p &= 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ p_0 &= 10^5 \text{ Па} \\ T_0 &= 300 \text{ К} \\ T_1 &= 167 + 273 \text{ К} \\ p_1 &= ? \end{aligned}$$

Решение:

1. Рассмотрим два состояния системы, выполним рисунок и расставим параметры системы.

2. Для начального состояния уравнение Менделеева-Клапейрона

$$p_0 V_1 = \nu R T_0 \quad (1)$$

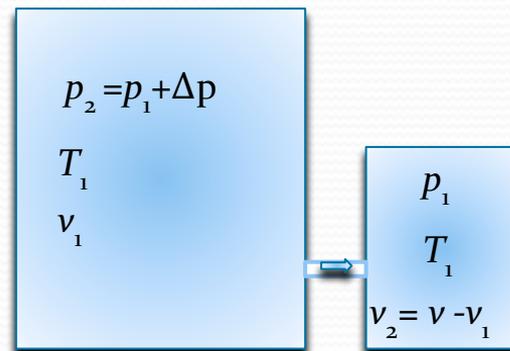
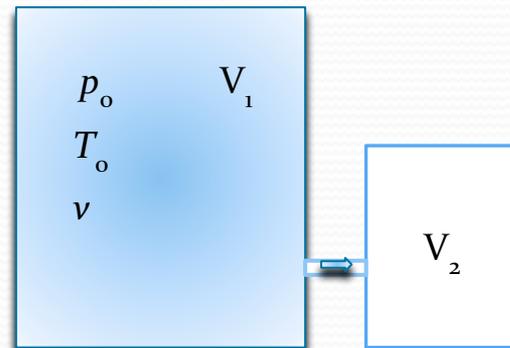
3. После нагрева уравнения состояния для газов в двух сосудах

$$(p_1 + \Delta p) V_1 = \nu_1 R T_1 \quad (2) \quad p_1 V_2 = (\nu - \nu_1) R T_1 \quad (3)$$

4. Решив систему уравнений, получим

$$p_1 = \frac{(p_0 T_1 - \Delta p T_0) V_1}{(V_1 + V_2) T_0}$$

Ответ: $p_1 \approx 27$ кПа.



Уравнение Менделеева-Клапейрона

Задача 2: В баллоне объемом $V = 1,5$ л находится воздух при нормальном давлении. За сколько ходов поршня разряжающего насоса, имеющего объем цилиндра $V_1 = 100$ см³, можно понизить давление в баллоне в $k = 100$ раз. Температуру считать постоянной.

Решение:

Дано:

$$\begin{aligned} V &= 1,5 \text{ л} \\ V_1 &= 100 \text{ см}^3 \\ k &= 100 \end{aligned}$$

$n = ?$

1. Рассмотрим два состояния системы, выполним рисунок и расставим параметры системы.

2. Начальное состояние $p_0 V = \nu RT$ (1)

3. Первый ход поршня насоса

$$p_1 V = (\nu - \Delta \nu_1) RT \quad p_1 V_1 = \Delta \nu_1 RT \quad (2) \quad (3)$$

4. Решив систему, получим

$$\Delta \nu_1 = \nu \frac{V_1}{V + V_1} \quad \nu_1 = \nu - \Delta \nu_1 = \nu \frac{V}{V + V_1} \quad p_1 = p_0 \frac{V}{V + V_1}$$

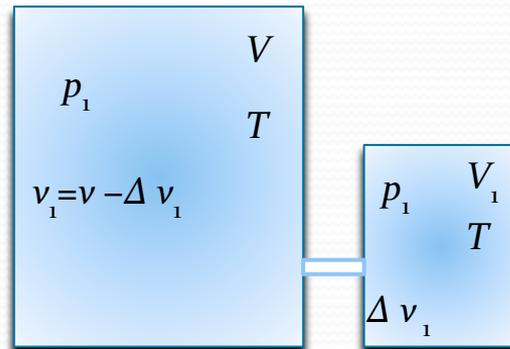
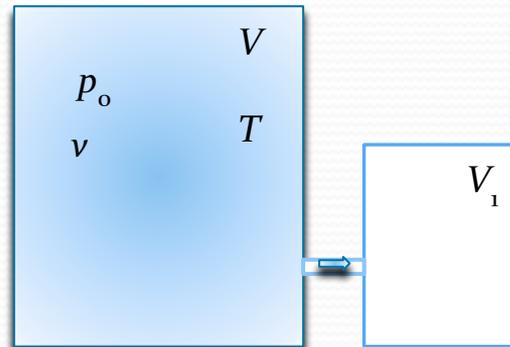
5. После 2-го хода поршня

$$\Delta \nu_2 = \nu_1 \frac{V_1}{V + V_1} = \nu \frac{V_1 V}{(V + V_1)^2} \quad \nu_2 = \nu_1 - \Delta \nu_2 = \nu \left(\frac{V}{V + V_1} \right)^2 \quad p_2 = p_1 \frac{V}{V + V_1} = p_0 \left(\frac{V}{V + V_1} \right)^2$$

6. После n -го хода поршня $p_n = p_0 \left(\frac{V}{V + V_1} \right)^n = \frac{p_0}{k}$

7. Выражая n , имеем $n = \frac{\lg k}{\lg(1 + V_1/V)}$

Ответ: $n = 71$.



Уравнение Менделеева-Клапейрона

Задача 3: В вертикальном закрытом с обоих торцов цилиндре находится массивный поршень, по обе стороны которого – по одному молю воздуха. При температуре $T_1 = 300$ К отношение верхнего объема к нижнему $n_1 = 4$. При какой температуре это отношение станет равным $n_2 = 3$? Трение не учитывать.

Решение:

Дано:

$$\nu = 1 \text{ моль}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$n_1 = 4$$

$$n_2 = 3$$

$$T_2 = ?$$

1. Рассмотрим два состояния системы, выполним рисунок и расставим параметры системы.

2. Условие равновесия поршня

$$F_{1н} + F_{1в} + mg = 0$$

$$p_{1н}S = p_{1в} + mg \quad (1)$$

$$F_{2н} + F_{2в} + mg = 0$$

$$p_{2н}S = p_{2в} + mg \quad (2)$$

3. Связь между объемами

$$V_{2в} = V_{1в} - \Delta V$$

$$V_{2н} = V_{1н} + \Delta V$$

$$n_1 = \frac{V_{1в}}{V_{1н}} \quad (3) \quad n_2 = \frac{V_{2в}}{V_{2н}} = \frac{V_{1в} - \Delta V}{V_{1н} + \Delta V} \quad (4)$$

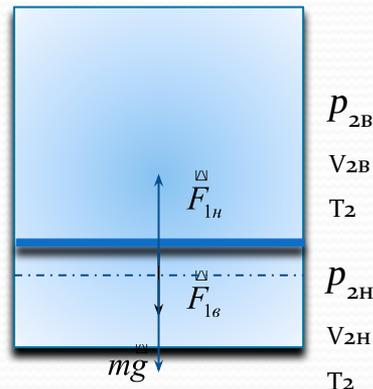
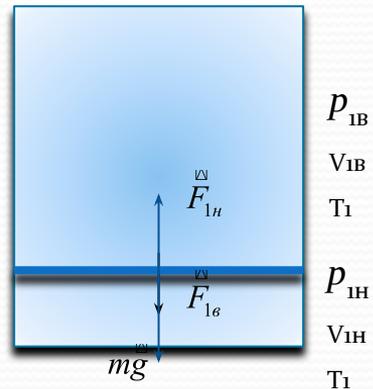
4. Уравнение Менделеева-Клапейрона

$$p_{1в}V_{1в} = \nu RT_1 \quad (5) \quad p_{1н}V_{1н} = \nu RT_1 \quad (6) \quad p_{2в}(V_{1в} - \Delta V) = \nu RT_2 \quad (7) \quad p_{2н}(V_{1н} + \Delta V) = \nu RT_2 \quad (8)$$

5. Решив систему уравнений, получим

$$T_2 = T_1 \frac{(n_1^2 - 1)n_2}{(n_2^2 - 1)n_1}$$

Ответ: $T_2 = 420$ К.



Колебания поршня

Задача 4: Найти период малых колебаний поршня массой m , разделяющего гладкий цилиндрический сосуд сечения S на две части длиной L каждая. По обе стороны от поршня находится газ при давлении p_0 и температуре T_0 . Считать, что при колебаниях температура газа не меняется.

Решение:

Дано:

m
 S
 L
 p_0, T_0

$T = ?$

1. Выведем поршень из положения равновесия. Под действием сил со стороны газов поршень будет совершать колебания.

$$ma = F_1 + F_2 + mg + N$$

2. В проекции на ось ox

$$ma_x = F_1 - F_2$$

$$ma_x = (p_1 - p_2)S \quad (1)$$

3. Уравнение Менделеева-Клапейрона

$$p_0LS = \nu RT_0 \quad (2) \quad p_1(L+x)S = \nu RT_0 \quad (3) \quad p_2(L-x)S = \nu RT_0 \quad (4)$$

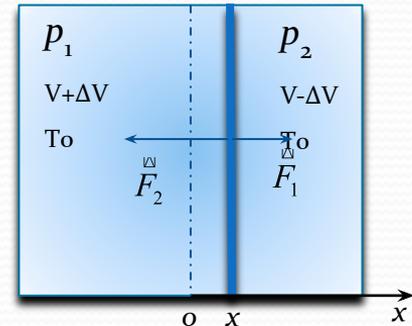
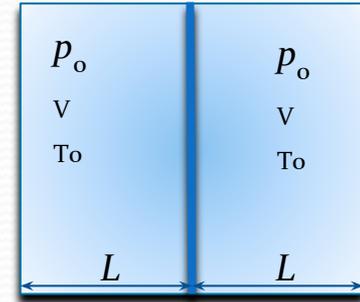
4. Воспользуемся приближением $p_1 + p_2 \approx 2p_0$ (5)

5. Решив систему уравнений, получим уравнение гармонических колебаний

$$a_x + \frac{2p_0S}{mL}x = 0 \quad a_x + \omega^2x = 0$$

6. Тогда период колебаний

Ответ:
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{mL}{2p_0S}}$$



Термодинамика

Задача 5: В горизонтальном цилиндрическом сосуде, закрытом поршнем, находится одноатомный идеальный газ. Первоначальное давление газа $p_1 = 4 \cdot 10^5$ Па. Расстояние от дна сосуда до поршня равно L . Площадь поперечного сечения поршня $S = 25$ см². В результате медленного нагревания газ получил количество теплоты $Q = 1,65$ кДж, а поршень сдвинулся на расстояние $x = 10$ см. При движении поршня на него со стороны стенок действует сила трения величиной $F_{\text{тр}} = 3 \cdot 10^3$ Н. Найдите L . Считать, что сосуд находится в вакууме.

Дано:

$$i=3$$

$$p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$S = 25 \text{ см}^2$$

$$Q = 1,65 \text{ кДж}$$

$$x = 10 \text{ см}$$

$$F_{\text{тр}} = 3 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

$$L = ?$$

Решение:

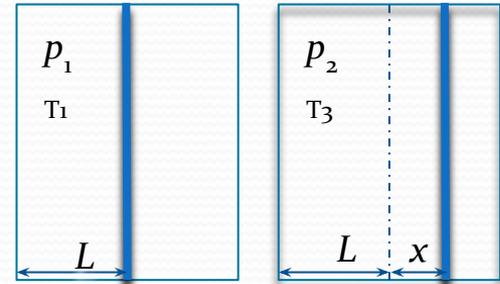
1. Рассмотрим первоначальное равновесие поршня.

$$p_1 S = 4 \cdot 10^5 \cdot 25 \cdot 10^{-4} = 10^3 \text{ Н} < F_{\text{тр}}$$

2. При нагревании поршень будет оставаться в покое до тех пор, пока

$$p_2 S = F_{\text{тр}} \quad (1)$$

3. Затем поршень будет сдвигаться при постоянном давлении p_2



4. Количество теплоты, полученное газом, складывается из количества теплоты, полученного при изохорном нагревании газа и количества теплоты, полученного при изобарном расширении газа

$$Q = Q_{12} + Q_{23} = \Delta U_{13} + A_{23} \quad (2) \quad \Delta U_{13} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_1) \quad (3) \quad A_{12} = p_2 S x = F_{\text{тр}} x \quad (4)$$

5. Уравнения Менделеева-Клапейрона $p_1 L S = \nu R T_1$ (5) $p_2 (L+x) S = \nu R T_3$ (6)

6. Решив систему уравнений, получим

Ответ:
$$L = \frac{Q - \frac{5}{2} F_{\text{тр}} x}{\frac{3}{2} (F_{\text{тр}} - p_1 S)} = 0,3 \text{ м.}$$

Влажность

Задача 6. Человек при частоте дыхания $n = 10$ раз в минуту при каждом вдохе вдыхает воздух объемом $V = 1$ л при температуре $t_1 = 27$ °С и относительной влажности $\phi_1 = 30\%$, а выдыхает при температуре $t_2 = 36$ °С и относительной влажности $\phi_2 = 100\%$. Определите массу воды, которая теряется организмом за сутки в процессе дыхания. Давления насыщенного пара при температурах t_1 и t_2 равны соответственно $p_{\text{нп1}} = 3,6$ кПа и $p_{\text{нп2}} = 6$ кПа.

Дано:

$$n = 10$$

$$V = 1 \text{ л}$$

$$t_1 = 27 \text{ °С}$$

$$\phi_1 = 30\%$$

$$t_2 = 36 \text{ °С}$$

$$\phi_2 = 100\%$$

$$p_{\text{нп1}} = 3,6 \text{ кПа}$$

$$p_{\text{нп2}} = 6 \text{ кПа}$$

$$m - ?$$

Решение:

1. Человек с воздухом вдыхает массу водяного пара

$$m_{\text{вдох}} = \rho_{\text{вн1}} V, \text{ а выдыхает } m_{\text{выдох}} = \rho_{\text{вн2}} V$$

2. Масса воды, теряемая за один вдох и выдох

$$\Delta m = m_{\text{выдох}} - m_{\text{вдох}} = (\rho_{\text{вн2}} - \rho_{\text{вн1}}) V \quad (1)$$

3. Плотности вдыхаемого и выдыхаемого пара

$$\rho_{\text{вн1}} = \frac{\phi_1}{100\%} \rho_{\text{нп1}} \quad (2) \quad \rho_{\text{вн2}} = \frac{\phi_2}{100\%} \rho_{\text{нп2}} \quad (3)$$

4. Давление связано с плотностью уравнением Менделеева-Клапейрона

$$p_{\text{нп}} = \frac{\rho_{\text{нп}}}{M} RT \quad (4)$$

5. За сутки человек делает $N = 24 \cdot 60 \cdot n$ (5) вдохов

6. Таким образом за сутки человек теряет $m = N \Delta m$ (6)

7. Решив систему уравнений, получим

$$\text{Ответ: } m = \frac{1440 \cdot n}{100\%} \left(\frac{\phi_2 p_{\text{нп2}}}{T_2} - \frac{\phi_1 p_{\text{нп1}}}{T_1} \right) \frac{MV}{R} \approx 0,5 \text{ кг.}$$



Спасибо за внимание!

Литература для подготовки к ЕГЭ

- Кабардин О.Ф. Физика: справочник для школьников и поступающих в вузы. Курс подготовки к ГИА, ЕГЭ и дополнительным вступ. испытаниям в вузы – М.: Арт-пресс школа, 2019. – 528 с.
- Демидова М.Ю. ЕГЭ 2020. Банк заданий. 1000 задач. – М.: Изд. “Экзамен”, 2020. – 430 с.
- Кабардин О.Ф. Физика. Подготовка к ЕГЭ. Вступительные испытания.–М.: Изд.“Экзамен”, 2011.– 477 с.
- Турчина Н.В. и др. 3800 задач по физике для школьников и поступающих в ВУЗы. – М.: Дрофа, 2000. – 672 с.
- Вишнякова Е.А. и др. Отличник ЕГЭ. Физика. Решение сложных задач. М.: Интеллект-Центр, 2010.– 368 с.
- Парфентьева Н.А. Задачи по физике для поступающих в вузы. – М.: Просвещение, 2008. – 303 с.
- Гольдфарб Н.И. Физика. Задачник. 10-11 кл. : учеб. пособие. – М.: Дрофа, 2018. – 398 с.
- Физика. Углубленный курс с решениями и указаниями. ЕГЭ, олимпиады, экзамены в вуз [Электронный ресурс] / Е. А. Вишнякова [и др.]; под ред. В. А. Макарова, С. С. Чеснокова. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 419 с.
- ЕГЭ. Физика: типовые экзаменационные варианты : 30 вариантов / под ред. М. Ю. Демидовой. — М. : Изд. Национальное образование, 2020. – 400 с.