

**Особенности решения  
задачи №27 (молекулярная  
физика), включённой в ЕГЭ  
по физике в 2022 году**

**Первухина Наталия  
Владимировна, учитель физики  
МБОУ СОШ №10**

Задача №27 по теме «Молекулярная физика» (молекулярно-кинетическая теория, термодинамика) относится к заданиям высокого уровня сложности, максимальный первичный балл за выполнение данного задания 3 балла.

В критериях оценивания выполнения развернутых ответов приводится подробная инструкция, в которой указывается, за что выставляется каждый балл – от нуля до максимального балла.

Примерное время на выполнение задания №27 экзаменационной работы составляет от 5 до 20 минут.

# Элементы содержания, проверяемые заданием №27 экзаменационной работы

<i>МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА</i>	
<i>МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА</i>	
2.1.1	Модели строения газов, жидкостей и твёрдых тел. Пусть термодинамическая система состоит из $N$ одинаковых молекул. Тогда количество вещества $\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{\mu}$ , где $N_A$ – число Авагадро, $m$ – масса системы, $\mu$ – молярная масса вещества
2.1.2	Тепловое движение атомов и молекул вещества
2.1.3	Взаимодействие частиц вещества
2.1.4	Диффузия. Броуновское движение
2.1.5	Модель идеального газа в МКТ: частицы газа движутся хаотически и не взаимодействуют друг с другом
2.1.6	Связь между давлением и средней кинетической энергией поступательного теплового движения молекул идеального газа (основное уравнение МКТ):

	$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \cdot \left( \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} \right) = \frac{2}{3} n \cdot \overline{\varepsilon_{\text{пост}}},$ <p>где <math>m_0</math> – масса одной молекулы,</p> $n = \frac{N}{V}$ <p>– концентрация молекул</p>
2.1.7	Абсолютная температура: $T = t^\circ + 273 \text{ К}$
2.1.8	Связь температуры газа со средней кинетической энергией поступательного теплового движения его частиц: $\overline{\varepsilon_{\text{пост}}} = \left( \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} \right) = \frac{3}{2} kT$
2.1.9	Уравнение $p = nkT$
2.1.10	<p>Модель идеального газа в термодинамике:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>{ Уравнение Менделеева – Клапейрона</li> <li>{ Выражение для внутренней энергии</li> </ul> <p>Уравнение Менделеева – Клапейрона (применимые формы записи):</p> $pV = \frac{m}{\mu} RT = \nu RT = NkT, \quad p = \frac{\rho RT}{\mu}.$ <p>Выражение для внутренней энергии одноатомного идеального газа (применимые формы записи):</p> $U = \frac{3}{2} \nu RT = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT = \nu c_v T = \frac{3}{2} pV$

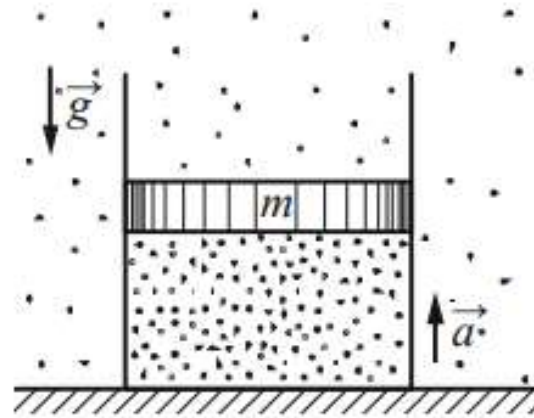
2.1.11	Закон Дальтона для давления смеси разреженных газов: $p = p_1 + p_2 + \dots$
2.1.12	Изопроцессы в разреженном газе с постоянным числом частиц $N$ (с постоянным количеством вещества $\nu$ ): изотерма ( $T = const$ ): $pV = const$ ,
	изохора ( $V = const$ ): $\frac{p}{T} = const$ , изобара ( $p = const$ ): $\frac{V}{T} = const$ Графическое представление изопроцессов на $pV$ -, $pT$ - и $VT$ - диаграммах
2.1.13	Насыщенные и ненасыщенные пары. Качественная зависимость плотности и давления насыщенного пара от температуры, их независимость от объёма насыщенного пара
2.1.14	Влажность воздуха. Относительная влажность: $\varphi = \frac{p_{\text{пара}}(T)}{p_{\text{насыщ. пара}}(T)} = \frac{\rho_{\text{пара}}(T)}{\rho_{\text{насыщ. пара}}(T)}$
2.1.15	Изменение агрегатных состояний вещества: испарение и конденсация, кипение жидкости
2.1.16	Изменение агрегатных состояний вещества: плавление и кристаллизация
2.1.17	Преобразование энергии в фазовых переходах
<b>ТЕРМОДИНАМИКА</b>	
2.2.1	Тепловое равновесие и температура
2.2.2	Внутренняя энергия
2.2.3	Теплопередача как способ изменения внутренней энергии без совершения работы. Конвекция, теплопроводность, излучение
2.2.4	Количество теплоты. Удельная теплоёмкость вещества $c$ : $Q = cm\Delta T$

2.2.5	<p>Удельная теплота парообразования <math>r</math>: <math>Q = rm</math></p> <p>Удельная теплота плавления <math>\lambda</math>: <math>Q = \lambda m</math></p> <p>Удельная теплота сгорания топлива <math>q</math>: <math>Q = qm</math></p>
2.2.6	<p>Элементарная работа в термодинамике: <math>A = p\Delta V</math>. Вычисление работы по графику процесса на <math>pV</math>-диаграмме</p>
2.2.7	<p>Первый закон термодинамики:</p> $Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12} = (U_2 - U_1) + A_{12}$ <p>Адиабата:</p> $Q_{12} = 0 \Rightarrow A_{12} = U_1 - U_2$
2.2.8	<p>Второй закон термодинамики, необратимость</p>
2.2.9	<p>Принципы действия тепловых машин. КПД:</p> $\eta = \frac{A_{\text{за цикл}}}{Q_{\text{нагр}}} = \frac{Q_{\text{нагр}} -  Q_{\text{хол}} }{Q_{\text{нагр}}} = 1 - \frac{ Q_{\text{хол}} }{Q_{\text{нагр}}}$
2.2.10	<p>Максимальное значение КПД. Цикл Карно</p> $\max \eta = \eta_{\text{Карно}} = \frac{T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}} = 1 - \frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}}$
2.2.11	<p>Уравнение теплового баланса: <math>Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0</math></p>

# Задача 1

27

В вертикальном цилиндрическом сосуде с гладкими стенками под подвижным поршнем массой  $10\text{ кг}$  и площадью поперечного сечения  $50\text{ см}^2$  находится разреженный газ (см. рисунок). При движении сосуда по вертикали с ускорением, направленным вверх и равным по модулю  $1\text{ м/с}^2$ , высота столба газа под поршнем постоянна и на  $5\%$  меньше, чем в покоящемся сосуде. Считая температуру газа под поршнем неизменной, а наружное давление постоянным, определите внешнее давление. Масса газа под поршнем постоянна.



определите внешнее

### Возможное решение

1. Запишем в инерциальной системе отсчёта второй закон Ньютона для неподвижного поршня в неподвижном сосуде:

$$(p_1 - p_0)S - mg = 0,$$

где  $m$  – масса поршня,  $S$  – площадь его поперечного сечения,  $p_0$  – внешнее давление,  $p_1$  – давление газа под поршнем в покоящемся сосуде.

2. В проекциях на ось  $Ox$  второй закон Ньютона для поршня, неподвижного относительно

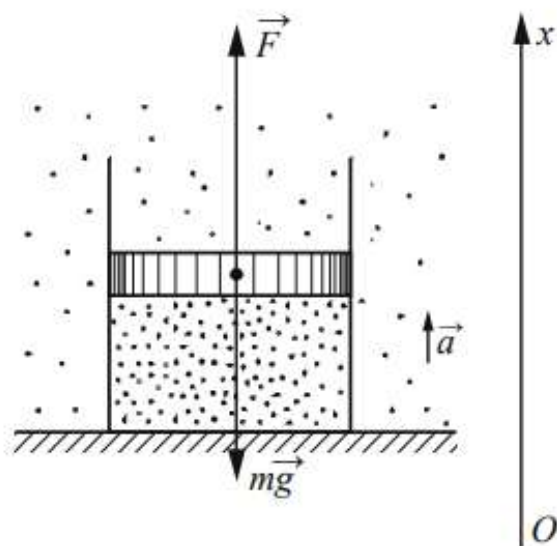
сосуда, движущегося с ускорением  $\vec{a}$ :  $(p_2 - p_0)S - mg = ma$ , где  $p_2$  – давление газа в сосуде, движущемся с ускорением. При этом результирующая сила давления  $F = (p_2 - p_0)S$  (см. рисунок).

3. По закону Бойля – Мариотта для газа под поршнем имеем:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \Rightarrow p_1 S h_1 = p_2 S h_2 \Rightarrow p_1 = p_2 (1 - \eta),$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – начальная и конечная высоты столба газа под поршнем

соответственно, а  $\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1}$  – относительное изменение высоты столба газа.



4. Решая систему уравнений

$$\begin{cases} p_1 S = p_0 S + mg; \\ p_2 S = p_0 S + mg + ma; \\ p_1 = p_2 (1 - \eta), \end{cases}$$

получим выражение для внешнего давления:

$$p_0 = \frac{m}{\eta S} \{ (1 - \eta)a - \eta g \} = \frac{10}{0,05 \cdot 50 \cdot 10^{-4}} \cdot (0,95 \cdot 1 - 0,05 \cdot 10) = 18 \cdot 10^3 \text{ Па.}$$

Ответ:  $p_0 = 18 \cdot 10^3 \text{ Па} = 18 \text{ кПа}$



## Задача 2

27

Сосуд объёмом  $V = 10$  л содержит  $\nu = 0,5$  моль гелия при  $t = 17$  °С. Если давление внутри сосуда превысит атмосферное в 9 раз, то сосуд лопнет. Найдите максимальное количество теплоты  $Q$ , которое можно сообщить гелию, чтобы сосуд не лопнул. Атмосферное давление  $p_a = 10^5$  Па.

## Возможное решение

1. Гелий нагревают изохорно, тогда по первому закону термодинамики  $Q = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R (T_1 - T)$ . Поэтому после передачи газу количества теплоты  $Q$  температура в сосуде

$$T_1 = T + \frac{2Q}{3\nu R}.$$

2. Согласно уравнению Клапейрона – Менделеева в конечном состоянии давление внутри сосуда

$$p = \frac{\nu R}{V} \left( T + \frac{2Q}{3\nu R} \right).$$

3. Чтобы сосуд не лопнул,

$$\frac{\nu R}{V} \left( T + \frac{2Q}{3\nu R} \right) \leq 9 p_a.$$

Отсюда получим:

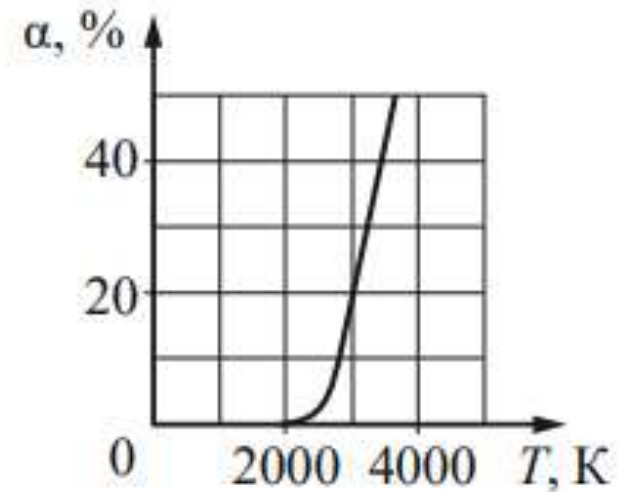
$$Q \leq \frac{3}{2} (9 p_a V - \nu R T) = \frac{3}{2} (9 \cdot 10^5 \cdot 10^{-2} - 0,5 \cdot 8,31 \cdot 290) \approx 11,7 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 11,7 \text{ кДж}.$$

Ответ:  $Q \approx 11,7 \text{ кДж}$

## Задача 3

27

В вольфрамовом цилиндре под поршнем водород при атмосферном давлении и температуре 300 К занимает объём 0,1 л. При нагревании водорода в цилиндре при постоянном давлении часть молекул распадается согласно реакции  $\text{H}_2 \leftrightarrow \text{H} + \text{H}$ , причём процент  $\alpha$  распавшихся молекул увеличивается с ростом температуры  $T$ , как показано на рисунке ( $\alpha$  — отношение числа распавшихся молекул к первоначальному числу молекул, выраженное в процентах). Какой объём занимает смесь газов в цилиндре при температуре 3000 К?



### Возможное решение

1. Состояние газа определяется уравнением Менделеева – Клапейрона:  $pV = NkT$ , где  $N$  – число частиц (атомов или молекул газа).

2. Изменение объёма газа при постоянном давлении приведёт к соотношению

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2 T_2}{N_1 T_1}. \quad \text{Здесь } T_1 \text{ и } T_2 \text{ – соответственно начальная и конечная}$$

температуры, а  $N_1$  и  $N_2$  – соответственно числа частиц.

3. Если  $\alpha$  – доля распавшихся молекул, то при нагревании  $\alpha N_1$  часть молекул распались, образовав  $2\alpha N_1$  атомов.

$$\text{Поэтому } N_2 = N_1(1 + \alpha) \text{ и } V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}(1 + \alpha).$$

По графику при  $T_2 = 3000 \text{ К}$   $\alpha = 0,2$ , поэтому

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}(1 + \alpha) = 0,1 \cdot 10 \cdot 1,2 = 1,2 \text{ л.}$$

Ответ:  $V_2 = 1,2 \text{ л}$

## Задача 4

27

Два одинаковых теплоизолированных сосуда соединены короткой трубкой с краном. В первом сосуде находится  $\nu_1 = 2$  моль гелия при температуре  $T_1 = 400$  К; во втором —  $\nu_2 = 3$  моль аргона при температуре  $T_2 = 300$  К. Кран открывают. В установившемся равновесном состоянии давление в сосудах становится  $p = 5,4$  кПа. Определите объём  $V$  одного сосуда. Объёмом трубки пренебречь.

**Возможное решение**

1. Поскольку в указанном процессе газ не совершает работы и система является теплоизолированной, то в соответствии с первым законом термодинамики суммарная внутренняя энергия газов сохраняется:

$$\frac{3}{2}v_1RT_1 + \frac{3}{2}v_2RT_2 = \frac{3}{2}(v_1 + v_2)RT,$$

где  $T$  — температура в объединённом сосуде в равновесном состоянии после открытия крана.

2. В соответствии с уравнением Менделеева — Клапейрона для конечного состояния можно записать:  $p(2V) = (v_1 + v_2)RT$ .

Исключая из двух записанных уравнений конечную температуру  $T$ , получаем искомое выражение для объёма:

$$V = \frac{(v_1T_1 + v_2T_2)R}{2p} = \frac{(2 \cdot 400 + 3 \cdot 300) \cdot 8,31}{2 \cdot 5400} \approx 1,3 \text{ м}^3.$$

**Ответ:**  $V \approx 1,3 \text{ м}^3$ .