Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО
Тульский государственный университет

Кафедра физики

Семин В.А.

Тестовые задания по механике и молекулярной физике

для проведения практических занятий
и контрольных работ
на кафедре физики

Часть II

Тула 2010 г.

Вторая часть тестовых заданий содержит задачи из трех разделов по механике и из семи разделов по термодинамике и молекулярной физике, которые будут предложены студентам первого курса инженерных направлений на второй контрольной работе (май).

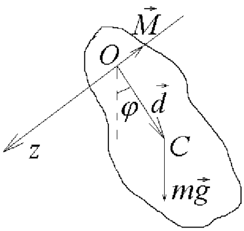
Тесты, нумерация которых содержит букву "э", соответствуют тестовым заданиям на аттестации (май) (в том числе на интернет-экзамене, как составная часть всего курса физики).

По каждому разделу даются формулы, формулировки законов и теорем, необходимые при решении конкретных задач. Каждая задача имеет ответ.

Предназначена для самостоятельной подготовки студентов и для проведения практических занятий по физике.

1. Свободные незатухающие колебания.

Математический маятник – материальная точка, подвешенная на невесомой и нерастяжимой нити (или невесомом и нерастяжимом стержне), совершающая колебания под действием силы тяжести.



Физический маятник – любое твердое тело, подвешенное на закрепленной горизонтальной оси, проходящей через точку *O,* лежащей выше центра масс *C* этого тела, совершающее колебания под действием момента силы тяжести.

Только при *малых* колебаниях (когда $\sin\varphi \approx \varphi$) угол между вертикалью и осью *OC* меняется во времени по гармоническому закону:

$$\boxed{\varphi = \varphi_0 \cos\left(\omega_0 t + \alpha_0\right)},$$

где $\boxed{\omega_0 = \sqrt{\dfrac{mgd}{I}}}$ – циклическая частота колебаний. (g – ускорение свободного падения, *d*= *OC* – расстояние от центра масс до оси вращения, *I* – момент инерции твердого тела относительно оси вращения). φ_0 – максимальный угол отклонения нити от вертикали (амплитуда колебаний). α_0 – начальная фаза колебаний.

Для системы твердых тел, совершающих колебание как единое целое, при расчете циклической частоты ω_0 необходимо учесть, что $m = \sum m_i$, $I = \sum I_i$, где m_i и I_i – массы и моменты инерции каждого тела в отдельности. Также необходимо рассчитать расстояние *d* от центра масс СИСТЕМЫ ТЕЛ до оси вращения.

Для математического маятника формула для циклической частоты выглядит так: $\boxed{\omega_0 = \sqrt{\dfrac{g}{l}}}$, где *l* – длина нити или стержня.

Чтобы найти угловую скорость вращения физического или математического маятников, надо взять производную от угла φ по времени:

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\varphi_0\omega_0 \sin\left(\omega_0 t + \alpha_0\right).$$

Маятник будет иметь максимальную угловую скорость (амплитуду угловой скорости) $\boxed{\left(\dfrac{d\varphi}{dt}\right)_{\max} = \varphi_0\omega_0}$ при прохождении им положения равновесия, когда φ =0 (нижняя точка траектории).

Пружинный маятник – твердое тело массой *m*, прикрепленное к пружине жесткости *k*, совершающее гармонические колебания под действием силы упругости. Тело может быть в покое, находясь в *положении равновесия*. Уравнение колебаний такого маятника выглядит так:

$$x = A\cos\left(\omega_0 t + \alpha_0\right),$$

где x – смещение тела из положения равновесия,
A – амплитуда или максимальное смещение из положения равновесия,
$\omega_0 = \sqrt{\dfrac{k}{m}}$ – циклическая частота колебаний пружинного маятника,
α_0 – начальная фаза колебаний.

Для нахождения скорости тела надо взять производную от x по времени:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin\left(\omega_0 t + \alpha_0\right).$$

Тело будет иметь максимальную скорость (амплитуду скорости) $v_{\max} = A\omega_0$ при прохождении им положения равновесия, когда $x = 0$.

Энергия пружинного маятника складывается из кинетической энергии тела и энергии деформации пружины $E = \dfrac{mv^2}{2} + \dfrac{kx^2}{2}$.

В отсутствие диссипативных сил в системе энергия маятника остается постоянной.

Период колебаний связан с циклической частотой: $T = \dfrac{2\pi}{\omega_0}$.

Частота колебаний $\nu = \dfrac{\omega_0}{2\pi} = \dfrac{1}{T}$.

Для физического маятника $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{I}{mgd}}$, $\nu = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{mgd}{I}}$.

Для математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$, $\nu = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{g}{l}}$.

Для пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$, $\nu = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{k}{m}}$.

1-1. Два одинаковых диска массы m и радиуса R положили на одну плоскость и приварили в одной точке. Затем получившуюся фигуру подвесили на горизонтальной оси, перпендикулярной плоскости фигуры и проходящей через точку O. Точка O и центры масс двух дисков лежат на одной прямой.

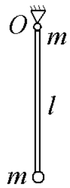
а) Найдите период малых колебаний фигуры вокруг точки O.

б) Найдите частоту малых колебаний фигуры вокруг точки O.

в) Найдите циклическую частоту малых колебаний фигуры вокруг точки O.

Трением в оси пренебречь. Принять g = 10 м/с^2. m = 1 кг, R = 1 м.

Ответы: а) <u>3,29</u> с; б) <u>0,303</u> Гц; в) <u>1,91</u> рад/с



1-2. Тонкий однородный стержень массы m и длины l подвешен на горизонтальной оси, проходящей перпендикулярно стержню через его конец. К нижнему концу прикрепили небольшой пластилиновый шарик такой же массы m. Найдите

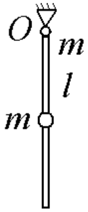
а) период малых колебаний такого маятника.

б) частоту малых колебаний такого маятника

в) циклическую частоту малых колебаний такого маятника

Трением в оси пренебречь. Принять g = 10 м/с^2. m = 1 кг, l = 1 м.

Ответы: а) 1,87 с; б) 0,534 Гц; в) 3,35 рад/с



1-3. Тонкий однородный стержень массы m и длины l подвешен на горизонтальной оси, проходящей перпендикулярно стержню через его конец. К центру стержня прикрепили небольшой пластилиновый шарик такой же массы m. Найдите

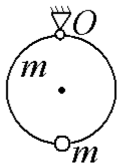
а) период малых колебаний такого маятника.

б) частоту малых колебаний такого маятника

в) циклическую частоту малых колебаний такого маятника

Трением в оси пренебречь. Принять g = 10 м/с^2. m = 1 кг, l = 1 м.

Ответы: а) 1,52 с; б) 0,659 Гц; в) 4,14 рад/с.



1-4. Тонкий однородный диск массы m и радиуса R подвешен на горизонтальной оси, проходящей перпендикулярно диску через его край O. К диаметрально противоположному краю диска прикрепили небольшой пластилиновый шарик такой же массы m. Найдите

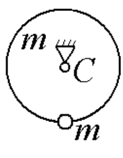
а) период малых колебаний такого маятника.

б) частоту малых колебаний такого маятника

в) циклическую частоту малых колебаний такого маятника

Трением в оси пренебречь. Принять g = 10 м/с^2. m = 1 кг, R = 1 м.

Ответы: а) 2,69 с; б) 0,372 Гц; в) 2,34 рад/с



1-5. Тонкий однородный диск массы m и радиуса R подвешен на горизонтальной оси, проходящей перпендикулярно диску через его центр C. К краю диска прикрепили небольшой пластилиновый шарик такой же массы m. Найдите

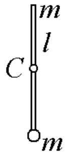
а) период малых колебаний такого маятника.

б) частоту малых колебаний такого маятника.

в) циклическую частоту малых колебаний такого маятника.

Трением в оси пренебречь. Принять g = 10 м/с^2. m = 1 кг, R = 1 м.

Ответы: а) 2,43 с; б) 0,411 Гц; в) 2,58 рад/с



1-6. Тонкий однородный стержень массы m и длины l подвешен на горизонтальной оси, проходящей перпендикулярно стержню через его центр C. К концу стержня прикрепили небольшой пластилиновый шарик такой же массы m. Найдите

а) период малых колебаний такого маятника.

б) частоту малых колебаний такого маятника.

в) циклическую частоту малых колебаний такого маятника.

Трением в оси пренебречь. Принять $g = 10$ м/с^2. $m = 1$ кг, $l = 1$ м.

Ответы: а) 1,62 с; б) 0,617 Гц; в) 3,87 рад/с

1-7. Маленький шарик подвешен на длинной нерастяжимой нити длины l и совершает гармонические колебания под действием силы тяжести. В нижней точке траектории шарик имеет угловую скорость ω. Найдите максимальный угол (в радианах), на который отклоняется нить в процессе движения.
$l = 1$м; $\omega = 1$ рад/с, $g = 10$ м/с^2.

Ответ: 0,316 рад

1-8. Тонкий однородный стержень длины l и массы m совершает гармонические незатухающие колебания под действием силы тяжести относительно горизонтальной оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец. В положении равновесия стержень имеет угловую скорость ω. Найдите максимальный угол (в радианах), на который отклоняется стержень в процессе движения. $m = 1$ кг, $l = 1$ м, $\omega = 1$ рад/с, $g = 10$ м/с^2.

Ответ: 0,258 рад

1-9. Грузик массой m прикреплен к пружине жесткости k и совершает незатухающие гармонические колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой A. В начальный момент грузик вышел из положения равновесия. За какое время он пройдет путь, равный а) половине амплитуды?; б) $\dfrac{\sqrt{3}A}{2}$?; в) $\dfrac{\sqrt{2}A}{2}$?
$m = 1$ кг, $k = 1$ Н/м; $A = 1$ см.

Ответы: а) 0,523 с; б) 1,05 с; в) 0,785 с

1-10. Грузик массой m прикреплен к пружине жесткости k и совершает незатухающие гармонические колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой A. В начальный момент грузик находился в крайнем положении. За какое время он пройдет путь, равный а) $1{,}5A$?; б) половине амплитуды?
$m = 1$ кг, $k = 1$ Н/м; $A = 1$см.

Ответы: а) 2,09 с; б) 1,05 с.

1-11. Грузик массой m прикреплен к пружине жесткости k и совершает незатухающие гармонические колебания в горизонтальной плоскости. Максимальная скорость, которую может приобрести грузик во время движения равна v_0. В начальный момент грузик находился в положении равновесия. За какое время его кинетическая энергия уменьшится

а) в 4 раза? б) в $\frac{4}{3}$ раза? в) в 2 раза? m = 1 кг, k = 1 Н/м; v_0 = 1 м/с.

Ответы: а) 1,05 с; б) 0,523 с; в) 0,785 с

2. Затухающие и вынужденные колебания. Сложение колебаний.

Если маятник любого типа находится в вязкой среде, то колебания такого маятника будут затухающими (или вообще могут не возникнуть).

Кинематическое уравнение затухающих колебаний для пружинного маятника выглядит так: $\boxed{x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha_0)}$,

где $\boxed{A = A_0 e^{-\beta t}}$ – амплитуда колебаний, уменьшающаяся со временем по экспоненциальному закону (не путать с максимальным отклонением от положения равновесия!), A_0 – начальная амплитуда колебаний (не путать с начальным смещением из положения равновесия!),

β – коэффициент затухания, характеризующий скорость уменьшения амплитуды ($\beta = \frac{1}{\tau}$, где τ – *время релаксации*, или время, за которое амплитуда уменьшится в e раз, где e = 2,72 – основание натурального логарифма).

$\boxed{\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$ – циклическая частота затухающих колебаний, где ω_0 – циклическая частота колебаний в отсутствие вязкой среды (без диссипативных сил). Видно, что если $\omega_0 < \beta$, то действительного значения для ω не существует, то есть колебания не возникают (слишком вязкая среда, например, мед или дёготь).

Период затухающих колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$.

Логарифмический декремент затухания $\boxed{\theta = \beta T}$ характеризует уменьшение амплитуды колебаний за один период.

Все вышесказанное относится к математическому и физическому маятникам, кроме переменной – вместо смещения x надо рассматривать угловое смещение φ: $$\varphi = A e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha_0)$$

Если к **пружинному маятнику** приложить внешнюю гармоническую силу $F = F_0 \cos(\omega_в t)$, то маятник будет совершать *вынужденные колебания* с частотой вынуждающей силы $\omega_в$ по закону:

$$x = A \cos(\omega_в t - \alpha),$$

где $A=\dfrac{F_0}{m\sqrt{\left(\omega_0^2-\omega_в^2\right)^2+4\beta^2\omega_в^2}}$ – амплитуда вынужденных колебаний.

$\alpha=\mathrm{arctg}\left(\dfrac{2\beta\omega_в}{\omega_0^2-\omega_в^2}\right)$ – отставание по фазе смещения от внешней силы.

Если затухание колебаний мало $(\beta\approx 0)$, то выражение для амплитуды упростится: $A=\dfrac{F_0}{m\left|\omega_0^2-\omega_в^2\right|}$, $\alpha = 0$.

Если к **физическому или математическому маятнику** приложить внешний момент сил $M=M_0\cos(\omega_в t)$, то уравнение вынужденных колебаний будет таким:
$$\varphi = A\cos(\omega_в t-\alpha),$$

где $A=\dfrac{M_0}{I\sqrt{\left(\omega_0^2-\omega_в^2\right)^2+4\beta^2\omega_в^2}}$ – угловая амплитуда вынужденных колебаний,

$\alpha=\mathrm{arctg}\left(\dfrac{2\beta\omega_в}{\omega_0^2-\omega_в^2}\right)$ – отставание по фазе углового смещения от внешнего момента силы. При $\beta\approx 0$: $A=\dfrac{M_0}{I\left|\omega_0^2-\omega_в^2\right|}$, $\alpha = 0$.

Если пружинный маятник прикреплен к точке, которая сама совершает гармонические колебания с той же частотой, то уравнение результирующих колебаний маятника легко найти методом фазовых (или векторных) диаграмм:
$$x = A_1\cos(\omega t+\alpha_1)+A_2\cos(\omega t+\alpha_2)=A\cos(\omega t+\alpha),$$

где $A=\sqrt{A_1^2+A_2^2+2A_1A_2\cos(\alpha_2-\alpha_1)}$ – амплитуда результирующих колебаний. При этом, если одно из колебаний происходит по синусоидальному закону, нужно проделать тригонометрическое преобразование: $\sin\alpha=\cos(\alpha-\pi/2)$ или $\cos(\alpha-\pi)=-\cos\alpha$.

2-1. Грузик массы m совершает собственные затухающие колебания на пружинке жесткости k по закону $x=Ae^{-at}\cos\left(bt+\dfrac{\pi}{3}\right)$.

A = 1 см, a = 0,1 с$^{-1}$, b = 1 с$^{-1}$.

а) Найдите жесткость пружины. m = 1 кг,

б) Найдите массу грузика. k = 1 Н/м.

Ответы: а) 1,01 Н/м; б) 0,990 кг

2-2. Грузик массы m совершает собственные затухающие колебания на пружинке жесткости k по закону $x = Ae^{-at}\cos\left(bt + \frac{\pi}{4}\right)$.

k = 2 Н/м, m =1 кг, A = 1 см,
а) Найдите коэффициент затухания. b = 1 с$^{-1}$.
б) Найдите логарифмический декремент затухания. b = 1 с$^{-1}$.
в) Найдите циклическую частоту таких колебаний. a = 1 с$^{-1}$.

Ответы: а) 1 с$^{-1}$; б) 6,28; в) 1 с$^{-1}$.

2-3. Небольшое тело, подвешенное на длинной нерастяжимой и невесомой нити длины l совершает собственные затухающие колебания по закону $\varphi = Ae^{-at}\cos\left(bt + \frac{\pi}{3}\right)$. Принять g = 10 м/с^2, A = 0,01 рад. Найдите
а) длину нити. a = 0,1 с$^{-1}$, b = 1 с$^{-1}$.
б) Найдите коэффициент затухания. l = 1 м, b = 1 с$^{-1}$.
в) Найдите циклическую частоту таких колебаний. l = 1 м, a = 1 с$^{-1}$.
г) Найдите логарифмический декремент затухания. l = 1 м, b = 1 с$^{-1}$.

Ответы: а) 9,90 м; б) 3 с$^{-1}$; в) 3 с$^{-1}$; г) 18,8.

2-4. Тонкий однородный стержень массы m и длины l совершает собственные затухающие колебания в вертикальной плоскости относительно горизонтальной оси, проходящей через его конец по закону $\varphi = Ae^{-at}\cos\left(bt + \frac{\pi}{3}\right)$.

A = 0,01 рад; g = 10 м/с^2.
а) Найдите длину стержня. , a = 0,1 с$^{-1}$, b = 1 с$^{-1}$.
б) Найдите коэффициент затухания. l = 1 м, b = 1 с$^{-1}$.
в) Найдите логарифмический декремент затухания. l = 1 м, b = 1 с$^{-1}$.
г) Найдите циклическую частоту колебаний. l = 1 м, a = 1 с$^{-1}$.

Ответы: а) 14,9 м; б) 3,74 с$^{-1}$; в) 23,5; г) 3,74 с$^{-1}$

2-5. Тонкий однородный стержень массы m и длины l совершает собственные затухающие колебания в жидкости в вертикальной плоскости относительно горизонтальной оси, проходящей через его конец по закону $\varphi = Ae^{-at}\cos\left(bt + \frac{\pi}{3}\right)$.

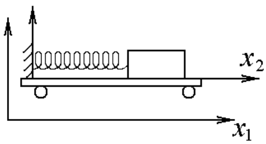
а) Во сколько раз увеличится циклическая частота колебаний стержня,
б) На сколько увеличится циклическая частота колебаний стержня,
если его вытащить из жидкости в воздух. Сопротивлением воздуха и трением в оси пренебречь A = 0,01 рад, l = 1 м, a = 1 с$^{-1}$, g = 10 м/с^2.

Ответы: а) 1,04 раз; б) 0,131 с$^{-1}$.

2-6. Грузик массы m подвешен на пружине жесткости k и совершает собственные затухающие колебания в жидкости по закону $x = Ae^{-at}\cos\left(bt + \frac{\pi}{3}\right)$.

а) На сколько увеличится циклическая частота колебаний грузика,
б) Во сколько раз увеличится циклическая частота колебаний грузика,
если его вытащить из жидкости в воздух. Сопротивлением воздуха и трением в оси пренебречь. A = 1 см, m = 1 кг, k = 2 Н/м, a = 1 с$^{-1}$.

Ответы: а) 0,414 с$^{-1}$; б) 1,41 раз



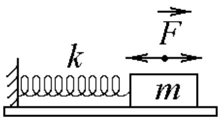
2-7. Невесомая пружинка одним концом прикреплена к тележке, а другим – к бруску, лежащему на тележке. Брусок совершает горизонтальные гармонические колебания относительно тележки по закону $x_2 = A\cos(\omega t + \varphi_2)$. Тележка в свою очередь совершает гармонические колебания с той же частотой в том же направлении относительно земли по закону

а) $x_1 = B\cos(\omega t + \varphi_1)$; б) $x_1 = B\sin(\omega t + \varphi_1)$.

Найдите амплитуду (в см) колебаний бруска относительно земли.

A = 1 см, B = 1 см, $\varphi_1 = \frac{\pi}{3}$, $\varphi_2 = \frac{\pi}{4}$

Ответы: а) 1,98 см; б) 1,59 см.



2-8. Невесомая пружинка жесткости k одним концом прикреплена к стене, а другим – к бруску массы m, лежащему на горизонтальной поверхности. Вдоль поверхности на брусок действует гармоническая сила $F = F_0\cos(\omega t)$.

а) Найдите амплитуду вынужденных колебаний бруска.
$F_0 = 1$ Н, m = 1 кг, k = 1 Н/м, ω = 2 с$^{-1}$.

б) Найдите жесткость пружины. $F_0 = 1$ Н, m = 1 кг, A = 1 см, ω = 2 с$^{-1}$.

в) Найдите массу бруска пружины. $F_0 = 1$ Н, k = 1 Н/м, A = 1 см, ω = 2 с$^{-1}$.

г) Найдите амплитуду силы F_0. m =1 кг, k = 1 Н/м, A = 1 см, ω = 2 с$^{-1}$.

д) Найдите циклическую частоту колебаний бруска.
F_0 = 1 Н, m =1 кг, k = 1 Н/м, A = 1 см.

Диссипативные силы в системе отсутствуют. Собственными колебаниями пренебречь.

Ответы: а) 0,333 м; б) 104 Н/м; в) 25,25 кг; г) 0,03 Н; д) 10,0 с$^{-1}$.

3. Специальная теория относительности.

Прямые преобразования Лоренца:	Обратные преобразования Лоренца:
$x = \dfrac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - v_0^2/c^2}}, \quad (1)$	$x' = \dfrac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - v_0^2/c^2}}, \quad (1a)$
$y = y', \; z = z',$	$y' = y, \; z' = z,$
$t = \dfrac{t' + x' \cdot v_0/c^2}{\sqrt{1 - v_0^2/c^2}}. \quad (2)$	$t' = \dfrac{t - x \cdot v_0/c^2}{\sqrt{1 - v_0^2/c^2}}. \quad (2a)$

x, y, z и t – координаты и момент времени события в лабораторной системе отсчета (K-система), x', y', z' и t' – координаты и момент времени события в системе, движущейся поступательно со скоростью v_0 относительно лабораторной системы отчета (K'-система). Оси x и x' направлены вдоль скорости v_0, ось y совпадает с осью y', а ось z – с осью z'. Используя прямые преобразования (1) и (2), получим:

$\Delta t = \dfrac{\Delta t' + \Delta x' \cdot v_0/c^2}{\sqrt{1 - v_0^2/c^2}}$ – промежуток времени между двумя событиями, наблюдаемыми в K-системе.

$\Delta x = \dfrac{\Delta x' + v_0 \Delta t'}{\sqrt{1 - v_0^2/c^2}}$ – разность координат точек в K-системе, в которых произошли два события.

$\Delta t'$ – промежуток времени между теми же событиями в K'-системе; $\Delta x'$ – разность координат точек в K'-системе, где произошли эти события.

Аналогичные формулы можно получить при использовании обратных преобразований (в этом случае в числителе надо знак "+" заменить на "–" и величины со штрихами заменить на величины без штрихов).

Преобразование скоростей в теории относительности:

Прямое преобразование $v_x = \dfrac{v'_x + v_0}{1 + v'_x v_0/c^2}$;

Обратное преобразование $v'_x = \dfrac{v_x - v_0}{1 - v_x v_0/c^2}$,

где v_x – проекция скорости частицы на ось x в K-системе, а v'_x – проекция скорости частицы на ось x' в K'-системе.

$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ – продольный размер движущегося со скоростью v тела уменьшается (l_0 – продольный размер тела в покое).

$\tau = \dfrac{\tau_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ – длительность любого процесса при движении увеличивается (τ_0 – длительность процесса в покое).

Полная энергия релятивистской частицы с массой m_0, движущейся со скоростью v равна $E = \dfrac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, энергия покоя $E_0 = m_0 c^2$, а кинетическая энергия равна $K = \dfrac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - m_0 c^2$.

Связь между полной энергией частицы и ее импульсом определяется четырех-вектором энергии-импульса:

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 - p^2 = m_0^2 c^2 .$$

3-1. Две ракеты движутся вдоль одной прямой
а) навстречу друг другу; б) вдоль одной прямой в одном направлении
со скоростями v_1 и v_2. Найти скорость второй ракеты, относительно наблюдателя в первой ракете. $v_1 = 0{,}6 \cdot c$, $v_2 = 0{,}8 \cdot c$

Ответы: а) $2{,}84 \cdot 10^8$ м/с; б) $1{,}15 \cdot 10^8$ м/с.

3-2. Две ракеты движутся вдоль одной прямой
а) в одном направлении; б) навстречу друг другу
со скоростями v_1 и v_2. Скорость второй ракеты относительно наблюдателя в первой ракете равна $v_{\text{отн}}$. Найти скорость второй ракеты, относительно неподвижного наблюдателя. $v_1 = 0{,}6 \cdot c$, $v_{\text{отн}} = 0{,}8 \cdot c$

Ответы: а) $2{,}84 \cdot 10^8$ м/с; б) $1{,}15 \cdot 10^8$ м/с

3-3. Космическая станция движется вдоль оси x со скоростью v_1. При проведении эксперимента космонавт заметил, что из радиоактивного источника вылетела α-частица со скоростью v_2
а) в направлении движения станции.
б) в противоположном движению станции направлении.
Найти скорость частицы, относительно неподвижного наблюдателя.
Скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. $v_1 = 0{,}6 \cdot c$, $v_2 = 0{,}8 \cdot c$

Ответы: а) $2{,}84 \cdot 10^8$ м/с; б) $1{,}15 \cdot 10^8$ м/с

3-4. Космическая станция движется вдоль оси x со скоростью v_1. Наблюдатель в лабораторной системе отсчета заметил, что при проведении эксперимента из станции вылетела α-частица со скоростью v_2

а) в противоположном движению станции направлении.

б) в направлении движения станции.

Найти скорость частицы, которую измерил космонавт на станции.

$v_1 = 0,6 \cdot c$, $v_2 = 0,8 \cdot c$

Ответы: а) $2{,}84 \cdot 10^8$ м/с; б) $1{,}15 \cdot 10^8$ м/с

3-5. α-частица в электрическом поле увеличила свою скорость от v_1 до v_2.

а) Какую работу совершило электрическое поле над частицей.

б) На сколько изменилась кинетическая энергия α-частицы.

Масса α-частицы в покое $m_\alpha = 6{,}7 \cdot 10^{-27}$кг. $v_1 = 0,6 \cdot c$, $v_2 = 0,8 \cdot c$

Ответы: а) 0,251 нДж; б) 0,251 нДж

3-6. Электрон в электрическом поле увеличил свою скорость от v_1 до v_2.

а) На сколько изменилась кинетическая энергия электрона.

б) Какую работу совершило электрическое поле над электроном.

Масса электрона в покое $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$кг. $v_1 = 0,6 \cdot c$, $v_2 = 0,8 \cdot c$

Ответы: а) $3{,}41 \cdot 10^{-14}$ Дж; б) $3{,}41 \cdot 10^{-14}$ Дж

3-7. Космическая станция движется вдоль оси x со скоростью v_1. Космонавт, проводя опыты с двумя лампочками, расположенными на расстоянии l друг от друга вдоль оси x, включает их одновременно. Наблюдатель в лабораторной системе отсчета заметил, что одна лампочка зажглась через промежуток времени τ после другой. Скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с;

а) Найти τ. $v_1 = 0,6 \cdot c$; $l = 1$ м.

б) Найти l. $v_1 = 0,6 \cdot c$; $\tau = 1$ мкс. в) Найти v_1. $l = 1$ м; $\tau = 3$ нс.

Ответы: а) 2,5 нс; б) 400 м; в) $2{,}01 \cdot 10^8$ м/с

3-8. Космическая станция движется вдоль оси x со скоростью v_1. Космонавт, проводя опыты с лампочкой, включает ее через промежуток времени τ. Наблюдатель в лабораторной системе отсчета заметил, что между двумя вспышками лампочки станция успела пройти путь l.

а) Найти v_1. $l = 1$ м; $\tau = 3$ нс.

б) Найти l. $v_1 = 0,6 \cdot c$; $\tau = 3$ нс. в) Найти τ. $v_1 = 0,6 \cdot c$; $l = 1$ м.

Ответы: а) $2{,}23 \cdot 10^8$ м/с; б) 0,675 м; в) 4,44 нс

3-9. Космическая станция движется вдоль оси x со скоростью υ_1. Космонавт проводит опыты с квадратной пластинкой со стороной b, лежащей на оси x. Наблюдатель в лабораторной системе отсчета заметил, что площадь пластины равна S. Скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

а) Найти υ_1. b = 1 м; S = 0,5 м^2.

б) Найти S. b = 1 м; $\upsilon_1 = 0,6 \cdot c$. в) Найти b. S = 1 м^2; $\upsilon_1 = 0,6 \cdot c$.

Ответы: а) 2,60·10^8 м/с; б) 0,8 м^2; в) 1,12 м

3-10. Неопознанный летающий объект в виде куба со стороной b приближается к Земле со скоростью υ_1, направленной вдоль одной из его сторон. Наблюдатель на Земле заметил, что объем объекта равен V.

а) Найти b. V = 1 м^3; $\upsilon_1 = 0,6 \cdot c$.

б) Найти V. b = 1 м; $\upsilon_1 = 0,6 \cdot c$.

в) Найти υ_1. b = 1 м; V = 0,5 м^3.

Ответы: а) 1,08 м; б) 0,8 м^3; в) 2,60·10^8 м/с

3-11. Летящая частица с массой покоя m_0 обладает энергией E и импульсом p.

а) Найти E (в нДж). $p = 10^{-18}$ кг·м/с; $m_0 = 6,7 \cdot 10^{-27}$ кг.

б) Найти p. E = 1 нДж; $m_0 = 6,7 \cdot 10^{-27}$ кг.

в) Найти m_0. E = 1 нДж; $p = 10^{-18}$ кг·м/с.

г) Во сколько раз масса частицы m_0 больше массы электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Ответы: а) 0,674 нДж; б) 2,66·10^{-18} кг·м/с; в) 1,06·10^{-26} кг; г) 11648 раз

3-12э. Космический корабль с космонавтом X летит со скоростью $\upsilon = 0,8c$ (c – скорость света в вакууме) мимо наблюдателя Y на неподвижной планете. Космонавт X медленно поворачивает метровый стержень из положения "1", параллельного направлению движения его корабля, в положение "2", перпендикулярное этому направлению. Тогда длина стержня с точки зрения неподвижного наблюдателя Y:

а) изменится от 1,0 м в положении "1" до 0,6 м в положении "2"

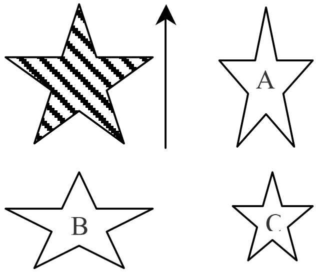
б) изменится от 0,6 м в положении "1" до 1,0 м в положении "2"

в) равна 1,0 м при любой ориентации стержня

г) изменится от 1,0 м в положении "1" до 1,67 м в положении "2"

3-13э. На борту космического корабля нанесена эмблема в виде геометрической фигуры. Из-за релятивистского сокращения длины эта фигура изменяет свою форму. Как она будет выглядеть для неподвижного наблюдателя, если корабль движется в направлении, указанном на рисунке стрелкой, со скоростью, сравнимой со скоростью света?

1) A 2) B 3) C



4. Работа идеального газа.

Работа идеального газа равна

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV .$$

При расширении работа газа положительна, при сжатии – отрицательна.

Чтобы получить функцию давления в зависимости от объема, надо использовать совместно с уравнением процесса уравнение Менделеева-Клапейрона

$$pV = \nu RT$$

4-1. В воздушном шарике находится одноатомный идеальный газ. Газ расширяется от объема V_0 до объема V_1, при этом его давление меняется по закону

а) $p = p_0 \dfrac{V}{V_0}$; б) $p = p_0 \left(\dfrac{V}{V_0}\right)^2$; в) $p = p_0 \left(\dfrac{V}{V_0}\right)^3$; г) $p = p_0 \left(\dfrac{V}{V_0}\right)^4$.

Найти работу (в МДж), совершенную газом в этом процессе.

$p_0 = 10^5$ Па; $V_0 = 1$ м^3; $V_1 = 2$ м^3.

Ответы: а) 0,15 МДж; б) 0,233 МДж; в) 0,375 МДж; г) 0,62 МДж

4-2. В воздушном шарике находится один моль одноатомного идеального газа. Газ расширяется от объема V_0 до объема V_1, при этом его температура меняется по закону

а) $T = T_0 \left(\dfrac{V}{V_0}\right)^6$; б) $T = T_0 \left(\dfrac{V}{V_0}\right)^7$; в) $T = T_0 \left(\dfrac{V}{V_0}\right)^8$; г) $T = T_0 \left(\dfrac{V}{V_0}\right)^9$

Найти работу (в кДж), совершенную газом в этом процессе. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}3\,\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$. $T_0 = 300$ К; $V_0 = 1$ м^3; $V_1 = 2$ м^3.

Ответы: а) 26,1 кДж; б) 45,2 кДж; в) 79,4 кДж; г) 141 кДж

4-3. В воздушном шарике находится один моль одноатомного идеального газа. Газ расширяется от объема V_0 до объема V_1, при этом его объем меняется по закону

а) $V = V_0\sqrt{\dfrac{T}{T_0}}$; б) $V = V_0\left(\dfrac{T}{T_0}\right)^{1/3}$; в) $V = V_0\left(\dfrac{T}{T_0}\right)^{1/4}$; г) $V = V_0\left(\dfrac{T}{T_0}\right)^{1/5}$

Найти работу (в кДж), совершенную газом в этом процессе. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31\,\text{Дж/моль}\cdot\text{К}$. T_0 = 300 К; V_0 = 1 м^3; V_1 =2 м^3.

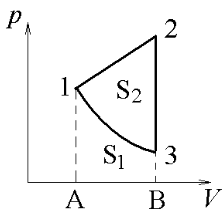
Ответы: а) 3,74 кДж; б) 5,82 кДж; в) 9,35 кДж; г) 15,5 кДж

4-4. В воздушном шарике находится один моль одноатомного идеального газа. Газ расширяется от объема V_0 до объема V_1, при этом его давление меняется по закону $p = p_0\left(\dfrac{T}{T_0}\right)^{1/2}$. Найти работу (в МДж), совершенную газом в этом процессе. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31\,\text{Дж/моль}\cdot\text{К}$.
T_0 = 300 К; p_0 = 10^5 Па; V_0 = 1 м^3; V_1 =2 м^3.

Ответ: 6,02 МДж

4-5. В воздушном шарике находится один моль одноатомного идеального газа. Газ расширяется от объема V_0 до объема V_1, при этом его температура меняется по закону $T = T_0\left(\dfrac{p}{p_0}\right)^{2}$. Найти работу (в МДж), совершенную газом в этом процессе. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31\,\text{Дж/моль}\cdot\text{К}$.
T_0 = 300 К; p_0 = 10^5 Па; V_0 = 1 м^3; V_1 =2 м^3.

Ответ: 6,02 МДж



4-6э. Идеальный газ совершает циклический процесс 1-2-3-1, как показано на рисунке, где процессы 2-3 - изохорический, а 3-1 - изотермический. Площадь S_2 фигуры 1-2-3 равна 10 Дж, а площадь S_1 фигуры 1-3-В-А равна 15 Дж.
В процессе 3-1 газ отдал окружающей среде тепло...

Ответ: 15 Дж

5. Теплоемкость.

Теплоемкость газа равна $C = \dfrac{dQ}{dT}$ – теплота, необходимая для нагревания тела (газа) на один Кельвин.

Зная теплоемкость, можно определить теплоту, переданную газу при нагревании: $$Q = \int_{T_1}^{T_2} C dT$$

Если задана зависимость теплоемкости от температуры в виде графика, то теплота есть *площадь под кривой* $C(T)$.

Изменение внутренней энергии идеального газа равна

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

где i – число степеней свободы молекулы. При не очень высокой и не очень низкой температуре (когда возбуждены вращательные степени свободы, но не возбуждены колебательные степени свободы) i = 3 для одноатомного газа, i =5 для двухатомного газа, i = 6 для трех- и (более)-атомного газа.

Первое начало термодинамики:

$$Q = \Delta U + A$$

теплота, переданная газу от нагревателя, идет на увеличение внутренней энергии газа и на совершение эти газом работы. Если внутренняя энергия газа при этом уменьшается, то $\Delta U < 0$.

Политропический процесс – процесс с постоянной теплоемкостью.

5-1. Теплоемкость газа зависит от температуры по закону

а) $C = C_0 \dfrac{T}{T_0}$; б) $C = C_0 \left(\dfrac{T}{T_0}\right)^3$; в) $C = C_0 \left(\dfrac{T}{T_0}\right)^5$; г) $C = C_0 \left(\dfrac{T}{T_0}\right)^7$.

Найти тепло, полученное газом, если его температура увеличилась с T_0 до T_1.
C_0 =1 Дж/К; T_0 =300 К; $T_1 = 2T_0$.

Ответы: а) 450 Дж; б) 1125 Дж; в) 3150 Дж; г) 9,56 кДж

5-2. Теплоемкость газа зависит от температуры по закону

а) $C = C_0 \left(\dfrac{T}{T_0}\right)^2$; б) $C = C_0 \left(\dfrac{T}{T_0}\right)^4$; в) $C = C_0 \left(\dfrac{T}{T_0}\right)^6$; г) $C = C_0 \left(\dfrac{T}{T_0}\right)^8$

При изменении температуры газа от T_0 до T_1 им была совершена работа A. Найти изменение внутренней энергии газа.
C_0 =1 Дж/К; T_0 =300 К; $T_1 = 2T_0$; A = 100 Дж.

Ответы: а) 600 Дж; б) 1760 Дж; в) 5,39 кДж; г) 16,9 кДж

5-3. Теплоемкость одного моля идеального одноатомного газа зависит от температуры по закону а) $C = C_0 \dfrac{T}{T_0}$; б) $C = C_0 \exp\left(\dfrac{T}{T_0}\right)$.

Найти работу, совершенную газом, при изменении температуры газа от T_0 до T_1. Универсальная газовая постоянная R = 8,3 Дж/моль·К;
C_0 =1 Дж/К; T_0 =300 К; $T_1 = 2T_0$.

Ответы: а) –3285 Дж; б) –2334 Дж

5-4. Теплоемкость одного моля идеального двухатомного газа зависит от температуры по закону а) $C = C_0 \dfrac{T}{T_0}$; б) . $C = C_0 \exp\left(\dfrac{T}{T_0}\right)$

Найти работу, совершенную газом, при изменении температуры газа от T_0 до T_1. Универсальная газовая постоянная R = 8,3 Дж/моль·К;
C_0 =1 Дж/К; T_0 =300 К; $T_1 = 2T_0$.

Ответы: а) – 5775 Дж; б) – 4824 Дж

5-5. Теплоемкость одного моля идеального трехатомного газа зависит от температуры по закону а) $C = C_0 \dfrac{T}{T_0}$; б) $C = C_0 \exp\left(\dfrac{T}{T_0}\right)$

Найти работу, совершенную газом, при изменении температуры газа от T_0 до T_1. Универсальная газовая постоянная R = 8,3 Дж/моль·К;
C_0 =1 Дж/К; T_0 =300 К; $T_1 = 2T_0$.

Ответы: а) – 7020 Дж; б) – 6069 Дж

5-6. Один моль идеального а) одноатомного; б) двухатомного; в) трехатомного газа совершает политропический процесс. При этом его температура увеличивается от T_0 до T_1, и газ совершает работу *A*. Найти теплоемкость газа. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31 \text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$.
T_0 =300 К; $T_1 = 2T_0$; A = 100 Дж.

Ответы: а) 12,8 Дж/К; б) 21,1 Дж/К; в) 25,3 Дж/К

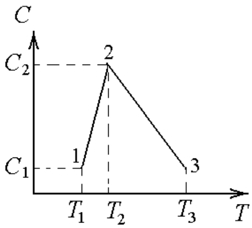
5-7. Один моль идеального а) одноатомного; б) двухатомного ; в) трехатомного газа совершает политропический процесс с теплоемкостью *C*. При этом его температура увеличивается на ΔT, и газ совершает работу *A*. Найти ΔT. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31 \text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$.
C = 30 Дж/К; A = 100 Дж.

Ответы: а) 5,7 К; б) 10,8 К; в) 19,7 К

5-8. Один моль идеального а) одноатомного; б) двухатомного; в) трехатомного газа совершает политропический процесс с теплоемкостью C. При этом его температура увеличивается на ΔT, и газ совершает работу A. Найти A. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$.

C = 30 Дж/К; ΔT = 10 К.

Ответы: а) 175 Дж; б) 92,3 Дж; в) 50,7 Дж



5-9. Идеальный газ совершает процесс 1–2–3. Его теплоемкость зависит от температуры, как показано на графике.

T_1 = 600 К; T_2 = 900 К; T_3 = 1800 К.

C_1 = 1 Дж/К; C_2 = 5 Дж/К.

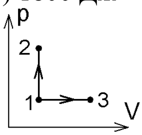
Найти

а) тепло, полученное газом в этом процессе.

б) Во сколько раз тепло, полученное на участке 2–3 больше тепла, полученного на участке 1–2.

в) На сколько джоулей тепло, полученное на участке 2–3 больше тепла, полученного на участке 1–2. Ответы: а) 3600 Дж; б) в 3 раза; в) 1800 Дж

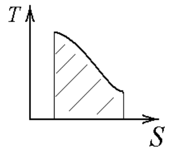
5-10э. Молярные теплоемкости азота в процессах $1 \to 2$ и $1 \to 3$ равны C_1 и C_2 соответственно. Их отношение C_1/C_2 равно: а) $3/5$ б) $5/3$ в) $5/7$ г) $7/5$



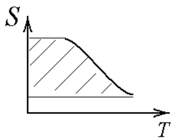
6. Энтропия.

Приращение энтропии равно $dS = \dfrac{dQ}{T}$.

Таким образом $Q = \int_{T_1}^{T_2} T dS$. Если задана функция энтропии в зависимости от температуры, надо взять дифференциал от этой функции, потом умножить на T, а затем интегрировать.



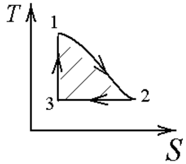
Если дана зависимость температуры от энтропии в виде графика, то теплота, полученная газом определяется, как площадь под кривой $T(S)$ (см. рис.).



Если задана зависимость энтропии от температуры в виде графика, то теплота равна площади слева от кривой $S(T)$ (см. рис.).

Коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклическому процессу, – это отношение работы рабочего тела (газа), произведенной за один цикл и теплоты, полученной за один цикл рабочим телом (газом) от нагревателя.

$$\eta = \frac{A}{Q_\text{н}}.$$



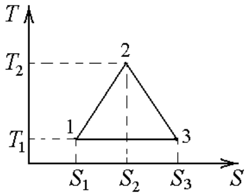
Если рабочий цикл тепловой машины изображен графически в виде замкнутой фигуры в координатах $T(S)$, то **работа** газа за цикл будет равна площади этой фигуры (см. рис. цикл 1-2-3-1). **Тепло**, полученное от нагревателя, находится при этом как площадь под кривой 1-2, где энтропия возрастает (на участке 2-3 тепло отдается холодильнику).

6-1. Энтропия идеального газа меняется по закону

а) $S = S_0 \frac{T}{T_0}$; б) $S = S_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^2$; в) $S = S_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^3$; г) $S = S_0 \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$

Найти тепло (в кДж), полученное газом при увеличении температуры от T_0 до T_1. S_0 = 100 Дж/К; T_0 = 300 К; $T_1 = 2T_0$.

Ответы: а) 45 кДж; б) 140 кДж; в) 337,5 кДж; г) 30 кДж



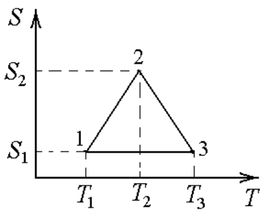
6-2. Тепловая машина совершает циклический процесс

1–2–3–1, изображенный на графике в координатах $T - S$. Найти коэффициент полезного действия тепловой машины.

T_1 = 300 К; T_2 = 1200 К;

S_1 = 2 Дж/К; S_2 = 4 Дж/К; S_3 = 6 Дж/К.

Ответ: 0,6

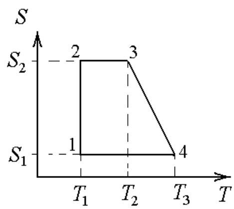


6-3. Тепловая машина совершает циклический процесс 1–3–2–1, изображенный на графике в координатах $S - T$. Найти коэффициент полезного действия тепловой машины.

T_1 = 600 К; T_2 = 1200 К; T_3 = 1800 К;

S_1 = 1 Дж/К; S_2 = 5 Дж/К.

Ответ: 0,4

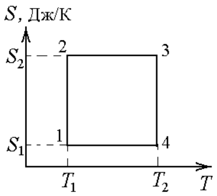


6-4. Тепловая машина совершает циклический процесс 1–4–3–2–1, изображенный на графике в координатах $S - T$. Найти коэффициент полезного действия тепловой машины.

T_1 = 300 К; T_2 = 600 К; T_3 = 900 К.

S_1 = 1 Дж/К; S_2 = 5 Дж/К.

Ответ: 0,6

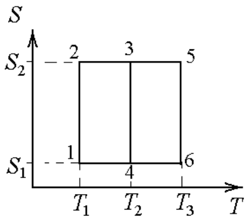


6-5. Тепловая машина совершает циклический процесс 1–4–3–2–1, изображенный на графике в координатах $S – T$. Найти коэффициент полезного действия тепловой машины.

T_1 = 300 К; T_2 = 600 К;

S_1 = 1 Дж/К; S_2 = 5 Дж/К.

Ответ: 0,50



6-6. Первая тепловая машина совершает циклический процесс 1–4–3–2–1, а вторая 1–6–5–2–1 (см. график).

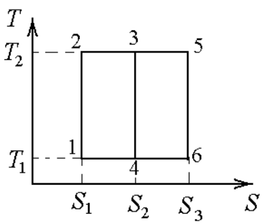
а) Во сколько раз больше коэффициент полезного действия второй тепловой машины.

б) На сколько процентов больше коэффициент полезного действия второй тепловой машины.

T_1 = 300 К; T_2 = 600 К; T_3 = 900 К.

S_1 = 1 Дж/К; S_2 = 5 Дж/К.

Ответы: а) 1,33 раза; б) 16,7%



6-7. Первая тепловая машина совершает циклический процесс 1–2–3–4–1, а вторая 4–3–5–6–4 (см. график). а) Найти отношение коэффициентов полезного действия первой и второй тепловых машин.

б) На сколько процентов больше коэффициент полезного действия второй тепловой машины.

T_1 = 300 К; T_2 = 600 К.

S_1 = 1 Дж/К; S_2 = 2 Дж/К; S_3 = 3 Дж/К.

Ответы: а) 1; б) 0%

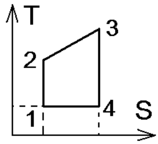
6-8. Один моль идеального а) одноатомного; б) двухатомного; в) трехатомного газа нагревается при постоянном давлении от T_0 до T_1. Найти приращение энтропии газа. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31 \text{Дж}/\text{моль}\cdot\text{К}$;

T_0 =300 К; $T_1 = 2T_0$.

Ответы: а) 14,4 Дж/К; б) 20,2 Дж/К; в) 23,0 Дж/К

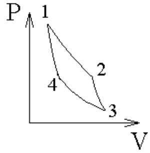
6-9. Один моль идеального а) трехатомного; б) двухатомного; в) одноатомного газа нагревается при постоянном объеме от T_0 до T_1. Найти приращение энтропии газа. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31 \text{Дж}/\text{моль}\cdot\text{К}$; T_0 =300 К; $T_1 = 2T_0$.

Ответы: а) 17,3 Дж/К; б) 14,4 Дж/К; в) 8,64 Дж/К



6-10э. На рисунке представлен прямой цикл тепловой машины в координатах $T-S$, где $T-$ термодинамическая температура, $S-$ энтропия. Укажите участки, на которых тепло поступает в рабочее тело машины от нагревателей, и участки, где тепло отдается холодильнику:

а) 12, 23 – поступает; 41 – отдается б) 23 – поступает; 41 – отдается
в) 12, 23 – поступает; 34, 41 – отдается г) 12 – поступает; 34 – отдается



6-11э. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно (две изотермы 1-2 и 3-4 и две адиабаты 2-3 и 4-1). Как изменится энтропия рабочего тела в процессе изотермического расширения 1-2?

1) энтропия возрастет
2) энтропия уменьшится 3) энтропия не изменится

7. Распределение Максвелла. Распределение Больцмана.

Функция распределения Максвелла молекул газа по скоростям (в равновесном состоянии) имеет следующий вид:

$F(v)=4\pi\left(\dfrac{m_0}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\dfrac{m_0 v^2}{2kT}\right)$, где $k=1{,}38\cdot 10^{-23}\ \dfrac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана; m_0 – масса одной молекулы, число Авогадро $N_A=6\cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$; универсальная газовая постоянная $R=8{,}31\text{Дж}/\text{моль}\cdot\text{К}$.

$F(v)dv=\dfrac{dN}{N}$ – относительная доля молекул, обладающих скоростями в диапазоне от v до $v+dv$.

Средняя вероятная скорость молекул – скорость, при которой функция распределения достигает максимума, т.е. $dF(v)/dv=0$

$$v_{\text{вер}}=\sqrt{\frac{2kT}{m_0}}=\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$, где μ – молярная масса газа.

Средняя скорость молекул (средняя арифметическая)

$$\langle v\rangle=\frac{\sum v_i}{N}=\sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}=\sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

Средняя квадратичная скорость молекул

$$v_{\text{кв}}=\sqrt{\frac{\sum v_i^2}{N}}=\sqrt{\frac{3kT}{m_0}}=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

Барометрическая формула для равновесной атмосферы, температура которой не меняется с высотой:

$$p=p_0\exp\left(-\frac{m_0gh}{kT}\right)=p_0\exp\left(-\frac{\Pi}{kT}\right)=p_0\exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right),$$

где m_0 – масса одной молекулы, μ – молярная масса газа, П – потенциальная энергия молекулы, h – высота над уровнем моря, p_0 – атмосферное давление на уровне моря.

Из уравнения молекулярно-кинетической теории $p = nkT$ при условии изотермичности атмосферы можно записать выражение для концентрации:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 gh}{kT}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{\Pi}{kT}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right),$$

где n_0 – концентрация молекул на уровне моря, n – концентрация молекул на высоте h.

7-1. В закрытом сосуде при температуре T находится
а) азот (молярная масса μ = 28 г/моль);
б) кислород (молярная масса μ = 32 г/моль)
в) гелий (молярная масса μ = 4 г/моль)
Найти относительную долю молекул, скорости которых лежат в интервале от $v_{\text{вер}}$ до $v_{\text{вер}} + \Delta v$, где $v_{\text{вер}}$ – наиболее вероятная скорость молекул.;
T = 300 К; Δv = 0,1 м/с.

Ответы: а) $1{,}97 \cdot 10^{-4}$; б) $2{,}1 \cdot 10^{-4}$; в) $\underline{7{,}44} \cdot 10^{-5}$.

7-2. В закрытом сосуде при температуре T находится
а) водород (молярная масса μ = 2 г/моль).
б) гелий (молярная масса μ = 4 г/моль)
в) кислород (молярная масса μ = 32 г/моль)
г) азот (молярная масса μ = 28 г/моль)
Найти относительную долю молекул, скорости которых лежат в интервале от $v_{\text{кв}}$ до $v_{\text{кв}} + \Delta v$, где $v_{\text{кв}}$ – средняя квадратичная скорость молекул.
T = 300 К; Δv = 0,1 м/с.

Ответы: а) $4{,}78 \cdot 10^{-5}$; б) $6{,}76 \cdot 10^{-5}$; в) $1{,}91 \cdot 10^{-4}$; г) $1{,}79 \cdot 10^{-4}$.

7-3. В закрытом сосуде при температуре T находится
а) азот (молярная масса μ = 28 г/моль);
б) кислород (молярная масса μ = 32 г/моль);
в) гелий (молярная масса μ = 4 г/моль);
г) водород (молярная масса μ = 2 г/моль).
Найти относительную долю молекул, скорости которых лежат в интервале от $\langle v \rangle$ до $\langle v \rangle + \Delta v$, где $\langle v \rangle$ – средняя скорость молекул. T = 300 К; Δv = 0,1 м/с.

Ответы: а) $1{,}91 \cdot 10^{-4}$; б) $2{,}04 \cdot 10^{-4}$; в) $7{,}20 \cdot 10^{-5}$; г) $5{,}09 \cdot 10^{-5}$.

7-4. Из маленького отверстия в стенке сосуда выходит пучок молекул, распределение которых по скоростям имеет вид

а) $F(v) = Av^3 \exp\left(-Bv^2\right)$; б) $F(v) = Av^4 \exp\left(-Bv^2\right)$; в) $F(v) = Av^5 \exp\left(-Bv^2\right)$

Найти наиболее вероятную скорость молекул. B = 0,01 с^2/м^2.

Ответы: а) 12,2 м/с; б) 14,1 м/с; в) 15,8 м/с

7-5. В закрытом сосуде при температуре T находится N молекул идеального газа с молярной массой μ. Сумма скоростей всех молекул равна $\sigma = \sum v_i$. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31 \text{Дж/моль} \cdot \text{К}$. Найти

а) температуру газа. $N = 10^{23}$; $\sigma = 10^{26}$ м/с; μ = 28 г/моль.

б) молярную массу газа. $N = 10^{23}$; $\sigma = 10^{26}$ м/с; $T = 851$ К.

Ответы: а) 1323 К; б) 0,018 кг/моль

7-6. В закрытом сосуде при температуре T находится N молекул идеального газа с молярной массой μ. Сумма квадратов скоростей всех молекул равна $\sigma = \sum v_i^2$. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31 \text{Дж/моль} \cdot \text{К}$. Найти

а) молярную массу газа. $N = 10^{23}$; $\sigma = 10^{29}$ м^2/с^2; $T = 1123$ К.

б) температуру газа T. $N = 10^{23}$; $\sigma = 10^{29}$ м^2/с^2; μ = 28 г/моль.

Ответы: а) 0,028 кг/моль; б) 1123 К

7-7. На берегу моря атмосферное давление составляет p_0, а температура воздуха t. Молярная масса воздуха μ = 29 г/моль. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31 \text{Дж/моль} \cdot \text{К}$. g = 10 м/с^2. Считая температуру одинаковой на разных высотах, найти

а) давление p на высоте H над уровнем моря. $p_0 = 10^5$ Па; $t = 27$ °С; $H = 1$ км;

б) На какой высоте H над уровнем моря давление будет p.

$p_0 = 10^5$ Па; $p = 5 \cdot 10^4$ Па; $t = 27$ °С;

в) температуру (в °С) на высоте H. $p_0 = 10^5$ Па; $p = 4 \cdot 10^4$ Па; $H = 8$ км

Ответы: а) 8,9·104 Па; б) 5959 м; в) 32°С

7-8. На берегу моря концентрация молекул воздуха равна n_0, а на высоте H над уровнем моря концентрация n. Молярная масса воздуха μ = 29 г/моль. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31 \text{Дж/моль} \cdot \text{К}$. g = 10 м/с^2.Считая температуру одинаковой на разных высотах, найти

а) температуру (в °С) на высоте H. $n_0 = 10^{25}$ м$^{-3}$; $n = 4 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$; $H = 8$ км.

б) концентрацию n на высоте H. $n_0 = 10^{25}$ м$^{-3}$; $t = 27$ °С; $H = 8$ км.

в) высоту H над уровнем моря. $n_0 = 10^{25}$ м$^{-3}$; $t = 27$ °С; $n = 6 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$

Ответы: а) 32°С; б) 3,94·1024 м–3; в) 4391 м

7-9. На берегу моря концентрация молекул воздуха равна n_0, а температура t°С. Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Считая температуру одинаковой на разных высотах, найти

а) потенциальную энергию одной молекулы воздуха на высоте, где концентрация молекул равна n. $n_0 = 10^{25}$ м$^{-3}$; $t = 27$ °С; $n = 6 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$.

б) концентрацию молекул на высоте, где потенциальная энергия одной молекулы равна П. $n_0 = 10^{25}$ м$^{-3}$; $t = 27$ °С; П = 10^{-21} Дж.

в) температуру воздуха (в °С). $n_0 = 10^{25}$ м$^{-3}$; $n = 8 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$; П = 10^{-21} Дж

Ответы: а) $2,11 \cdot 10^{-21}$ Дж; б) $7,95 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$; в) 52°С

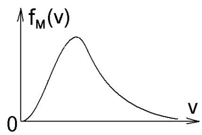
7-10. На берегу моря атмосферное давление составляет p_0, а температура воздуха t одинаковая на разных высотах. Молярная масса воздуха μ = 29 г/моль. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/моль$\cdot$К. g = 10 м/с^2. Если подняться на высоту H над уровнем моря, то

а) во сколько раз будет меньше давление p. $t = 27$ °С; H =1 км.

б) на сколько станет меньше давление p. p_0 =10^5 Па; $t = 27$ °С; H =1 км.

Ответы: а) в 1,12 раза; б) $1,1 \cdot 10^4$ Па.

7-11э. На рисунке представлен график распределения молекул идеального газа по величинам скоростей (распределение Максвелла). С ростом температуры T газа площадь под этим графиком будет:



а) оставаться неизменной б) расти пропорционально $\sqrt{T}$

в) расти пропорционально T г) расти пропорционально $T^{3/2}$

8. Частота ударов молекул о стенку сосуда.

Число ударов молекул газа о стенку площадью $S = 1$ м^2 за одну секунду.

$$\nu = \frac{1}{4} n \langle v \rangle,$$

где n – концентрация молекул, $\langle v \rangle$ – средняя скорость молекул газа.

8-1. Один моль водорода находится в сосуде с объемом V при температуре T. Найти число ударов молекул о площадку стенки сосуда S за одну секунду.

V= 1 м^3; T = 300 К; S = 1 см^2; μ = 2 г/моль.

Ответ: $2,67 \cdot 10^{22}$.

8-2. В сосуде с объемом V находится N молекул водорода при температуре T. Найти число ударов молекул о площадку стенки сосуда S за одну секунду.

V= 1 м^3; $N = 10^{23}$; T = 300 К; S = 1 см^2; μ = 2 г/моль.

Ответ: $4{,}46 \cdot 10^{21}$

8-3. В сосуде с объемом V находится N молекул водорода, средняя вероятная скорость которых равна $v_{\text{вер}}$. Найти число ударов молекул о площадку стенки сосуда S за одну секунду.

V= 1 м^3; $N = 10^{23}$; $v_{\text{вер}}$ = 500 м/с; S = 1 см^2; μ = 2 г/моль.

Ответ: $1{,}41 \cdot 10^{21}$

8-4. В сосуде с объемом V находится N молекул водорода, средняя квадратичная скорость которых равна $v_{\text{кв}}$. Найти число ударов молекул о площадку стенки сосуда S за одну секунду.

V= 1 м^3; $N = 10^{23}$; $v_{\text{кв}}$ = 500 м/с; S = 1 см^2; μ = 2 г/моль.

Ответ: $1{,}15 \cdot 10^{21}$

8-5. В сосуде с объемом V находится N молекул водорода. Сумма величин скоростей всех молекул равна $\sigma = \sum v_i$. Сколько молекул вылетит из отверстия в стенке сосуда с площадью S за одну секунду.

V= 1 м^3; $N = 10^{24}$; $\sigma = 5 \cdot 10^{26}$ м/с; S = 1 см^2; μ = 2 г/моль.

Ответ: $1{,}25 \cdot 10^{22}$

8-6. В сосуде с объемом V находится N молекул водорода. Через отверстие в стенке сосуда с площадью S за одну секунду вылетает N_1 молекул. Найти температуру газа в сосуде. V= 1 м^3; $N = 10^{23}$; $N_1 = 5 \cdot 10^{21}$; S = 1 см^2; μ = 2 г/моль.

Ответ: 378 К

8-7. В первом сосуде с объемом V находится N_1 молекул водорода

(μ_1 = 2 г/моль), а во втором таком же сосуде находится N_2 молекул азота

(μ_2=28 г/моль). В первом сосуде сделали отверстие площадью S_1, а во втором S_2. Число молекул, вылетающих за одну секунду из первого сосуда в n раз больше, чем из второго. Во сколько раз температура газа в первом сосуде отличается от температуры газа во втором сосуде.

V= 1 м^3; $N_1 = 9 \cdot 10^{23}$; $N_2 = 10^{24}$; S_1 = $\underline{1}$ см^2; S_2 = 2 см^2; n = $\underline{2}$.

Ответ: в 1,41 раза

8-8. В первом сосуде с объемом V находится N_1 молекул водорода ($\mu_1 = 2$ г/моль), а во втором таком же сосуде находится N_2 молекул азота (μ_2=28 г/моль). В сосудах сделали отверстия площадью S_1 и S_2. Число молекул, вылетающих за одну секунду из первого сосуда в n раз больше, чем из второго. Найти отношение площадей S_1/S_2 , если температуры газов в сосудах одинаковы. V= 1 м^3; $N_1 = 10^{23}$; N_2= 10^{24}; $n = 3$.

Ответ: 8,02

8-9. В первом сосуде с объемом V находится N_1 молекул водорода ($\mu_1 = 2$ г/моль) со средней квадратичной скоростью $v_{\text{кв}1}$, а во втором таком же сосуде находится N_2 молекул азота (μ_2=0,028 кг/моль) со средней вероятной скоростью $v_{\text{вер}2}$. В сосудах сделали одинаковые отверстия площадью S.

V= 1 м^3; $N_1 = 10^{23}$; N_2= 10^{24}; $v_{\text{кв}1}$ = 500 м/с; $v_{\text{вер}2}$ =400 м/с; S = 1 мм^2.

а) На сколько отличается число молекул, вылетающих из разных сосудов за одну секунду.

б) Во сколько раз число молекул, вылетающих за одну секунду из второго сосуда, больше, чем из первого?

Ответы: а) $1{,}01\cdot10^{20}$; б) в 9,80 раз

8-10. Идеальный газ находился в закрытом сосуде, а средняя квадратичная скорость молекул была равна $v_{\text{кв}}$. Потом газ был нагрет так, что средняя вероятная скорость молекул стала равна $v_{\text{вер}}$. $v_{\text{кв}}$ =500 м/с; $v_{\text{вер}}$ =450 м/с.

Найти:

а) отношение частоты ударов молекул о единичную площадку в первом и во втором состояниях ν_1/ν_2 .

б) отношение частоты ударов молекул о единичную площадку во втором и в первом состояниях ν_2/ν_1 .

Ответы: а) 0,907; б) 1,10

8-11. Идеальный газ находился в закрытом сосуде, а средняя квадратичная скорость молекул была равна $v_{\text{кв}}$. Потом газ был нагрет так, что средняя скорость молекул стала равна $\langle v\rangle$. $v_{\text{кв}}$ =500 м/с; $\langle v\rangle$ =470 м/с. Найти:

а) отношение частоты ударов молекул о единичную площадку во втором и в первом состояниях ν_2/ν_1 .

б) отношение частоты ударов молекул о единичную площадку в первом и во втором состояниях ν_1/ν_2 .

Ответы: а) 1,02; б) 0,980.

8-12. Идеальный газ находился в закрытом сосуде, а средняя скорость молекул была равна $\langle v \rangle$. Потом газ был нагрет так, что средняя вероятная скорость молекул стала равна $v_{\text{вер}}$. $\langle v \rangle$=500 м/с; $v_{\text{вер}}$ =470 м/с. Найти:

а) отношение частоты ударов молекул о единичную площадку в первом и во втором состояниях ν_1/ν_2.

б) Найти отношение частоты ударов молекул о единичную площадку во втором и в первом состояниях ν_2/ν_1.

Ответы: а) 0,943; б) 1,06

9. Длина свободного пробега и эффективный диаметр молекул.

Длина свободного пробега – это среднее расстояние, проходимое молекулой между двумя последовательными столкновениями с другими молекулами.

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n},$$

где $\sigma = \pi d^2$ – эффективное сечение молекул; d – эффективный диаметр молекул, n – концентрация молекул.

9-1. Один моль кислорода (μ = 32 г/моль) находится в закрытом сосуде под давлением p и имеет температуру T. Эффективный диаметр молекул d. Найти длину свободного пробега молекул (в нм). $p = 10^5$Па; T =300 К; $d = 10^{-9}$ м.

Ответ: 9,32 нм

9-2. Один моль кислорода (μ = 32 г/моль) находится в закрытом сосуде с объемом V. Эффективный диаметр молекул d. Найти длину свободного пробега молекул (в нм). $V = 1$ м^3; $d = 10^{-9}$ м.

Ответ: 375 нм

9-3. Один моль кислорода (μ = 32 г/моль) находится в закрытом сосуде с объемом V. Эффективное сечение молекул σ. Найти длину свободного пробега молекул (в мкм). $V = 1$ м^3; $\sigma = 10^{-18}$ м^2.

Ответ: 1,18 мкм

9-4. Один моль кислорода (μ = 32 г/моль) находится в закрытом сосуде с объемом V. Длина свободного пробега λ. Найти

а) эффективное сечение молекул (в нм^2). $V = 1$ м^3; $\lambda = 10^{-8}$ м.

б) эффективный диаметр молекул (в нм).

Ответы: а) 118 нм^2; б) 6,12 нм

9-5. Один моль кислорода (μ = 32 г/моль) находится в сосуде под давлением p_1. При неизменной температуре длина свободного пробега увеличилась в 2 раза, а давление стало p_2. Считая эффективный диаметр молекул неизменным, найти

а) отношение p_1/p_2 .

б) отношение p_2/p_1 .

Ответы: а) 2; б) 0,5.

9-6. Один моль кислорода (μ = 32 г/моль) находится в сосуде при температуре T_1. При неизменном давлении длина свободного пробега а) увеличилась в 2 раза; б) уменьшилась в 2 раза, а температура стала равной T_2. Считая эффективный диаметр молекул неизменным, найти

А) отношение T_1/T_2 .

Б) отношение T_2/T_1 .

Ответы: аА) 0,5; аБ) 2; бА) 2; бБ) 0,5.

9-7. Один моль кислорода (μ = 32 г/моль) находится в сосуде под поршнем. Длина свободного пробега молекул равна λ_1. При неизменном давлении температура а) увеличилась в 2 раза; б) уменьшилась в 2 раза, а длина свободного пробега становится равной λ_2. Считая эффективный диаметр молекул неизменным, найти

А) отношение λ_2/λ_1 .

Б) отношение λ_1/λ_2 .

Ответы: аА) 2; аБ) 0,5; бА) 0,5; бБ) 2.

10. Число степеней свободы.

Числом степеней свободы молекулы называется число независимых координат, с помощью которых можно полностью описать положение молекулы в пространстве.

Число поступательных степеней свободы $i_{\text{пост}} = 3$ для любых молекул.

Число вращательных степеней свободы $i_{\text{вращ}} = 2$ для двухатомных молекул и $i_{\text{вращ}} = 3$ для трех- и более атомных молекул.

Число колебательных степеней свободы для молекул, у которых три и более атомов, равно $i_{\text{колеб}} = 3N - 6$, где N – число атомов в молекуле.

У двухатомной молекулы одна колебательная степень свободы.

Средняя энергия молекулы рассчитывается из распределения Максвелла-Больцмана, откуда следует, что на каждую поступательную и вращательную степень свободы приходится средняя энергия, равная $\frac{1}{2}kT$ (теорема о равнораспределении энергии по степеням свободы). Но на каждую колебательную степень свободы приходится средняя энергия kT. Таким образом средняя энергия одной молекулы находится по формуле:

$$\langle E\rangle = \left(i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2\cdot i_{\text{колеб}}\right)\cdot\frac{1}{2}kT = \frac{i}{2}kT,$$

где $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2\cdot i_{\text{колеб}}$.

Зная среднюю энергию одной молекулы, можно рассчитать внутреннюю энергию всего газа:

$$U = N\langle E\rangle = N\frac{i}{2}kT = \nu N_A\frac{i}{2}kT = \frac{i}{2}\nu RT$$

Через число i определяется молярная теплоемкость при постоянном давлении c_p и при постоянном объеме c_V, а также показатель адиабаты γ:

$$c_p = \frac{i+2}{2}R;\quad c_V = \frac{i}{2}R;\quad \gamma = \frac{c_p}{c_V} = \frac{i+2}{i}.$$

10-1. Идеальный а) двухатомный; б) трехатомный; в) четырехатомный газ находится в закрытом сосуде при очень низкой температуре, когда вращательные степени свободы не возбуждены. Средняя энергия одной молекулы при этом равна $\langle E_1\rangle = 2\cdot10^{-21}$Дж.

На сколько джоулей увеличится средняя энергия молекулы:

А) при возбуждении всех вращательных степеней свободы без возбуждения колебательных степеней свободы. Температура при этом увеличилась в 2 раза..

Б) при возбуждении всех вращательных и колебательных степеней свободы. Температура при этом увеличилась в 3 раза.

Ответы: А) а) $4{,}67\cdot10^{-21}$ Дж; б) $6\cdot10^{-21}$ Дж; в) $6\cdot10^{-21}$ Дж
Б) а) $1{,}2\cdot10^{-}20$ Дж; б) $2{,}2\cdot10^{-20}$ Дж; в) $3{,}4\cdot10^{-20}$ Дж

10-2. Идеальный а) двухатомный; б) трехатомный; в) четырехатомный газ находится в закрытом сосуде при очень низкой температуре, когда вращательные степени свободы не возбуждены. Средняя энергия одной молекулы при этом равна $\langle E_1\rangle = 2\cdot10^{-21}$Дж. Во сколько раз увеличится средняя энергия молекулы

А) при возбуждении всех вращательных степеней свободы без возбуждения колебательных степеней свободы. Температура при этом увеличилась в 2 раза.

Б) при возбуждении всех вращательных и колебательных степеней свободы. Температура при этом увеличилась в 3 раза.

Ответы: А) а) в 3,33 раза; б) в 4 раза; в) в 4 раза
Б) а) в 7 раз; б) в 12 раз; в) в 18 раз

10-3. В двух сосудах находятся по одному молю кислорода O_2 и углекислого газа CO_2. Газы считать идеальными. А) Колебательные степени свободы не возбуждены.; Б) Колебательные степени свободы все возбуждены.

а) Во сколько раз; б) на сколько (Дж/моль·К) молярная теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении больше, чем молярная теплоемкость кислорода при постоянном объеме?

Ответы: А) а) 1,6 раза; б) 12,5 Дж/моль·К
Б) а) 2 раза; б) 29,1 Дж/моль·К

10-4. В двух сосудах находятся по одному молю гелия *He* и углекислого газа CO_2. Газы идеальные.
А) Колебательные степени свободы не возбуждены.
Б) Колебательные степени свободы все возбуждены. Найти:
а) во сколько раз молярная теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении больше, чем молярная теплоемкость гелия при постоянном объеме?
б) во сколько раз молярная теплоемкость углекислого газа при постоянном объеме больше, чем молярная теплоемкость гелия при постоянном давлении?

Ответы: А) а) 2,67 раза; б) 1,2 раза
Б) а) 4,67 раза; б) 2,4 раза

10-5. В двух сосудах находятся по одному молю гелия *He* и углекислого газа CO_2. Газы считать идеальными.
А) Колебательные степени свободы не возбуждены.
Б) Колебательные степени свободы все возбуждены

а) На сколько (Дж/моль·К) молярная теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении больше, чем молярная теплоемкость гелия при постоянном объеме?

б) На сколько (Дж/моль·К) молярная теплоемкость углекислого газа при постоянном объеме больше, чем молярная теплоемкость гелия при постоянном давлении?

Ответ: А) а) 20,8 Дж/моль·К; б) 4,16 Дж/моль·К
Б) а) 45,7 Дж/моль·К; б) 29,1 Дж/моль·К

10-6. В закрытом сосуде находится один моль водяных паров (H_2O) при комнатной температуре. Пары нагревают до температуры, когда все колебательные степени свободы молекул будут возбуждены. Найти:

а) во сколько раз уменьшится показатель адиабаты для пара.

б) На сколько уменьшится показатель адиабаты пара.

Ответы: а) 1,14 раза; б) 0,167

10-7. В закрытом сосуде находится один моль азота N_2 при низкой температуре (вращательные степени свободы не возбуждены). Газ нагревают до температуры, когда все колебательные степени свободы молекул будут возбуждены?

а) Во сколько раз уменьшится показатель адиабаты газа.

б) На сколько уменьшится показатель адиабаты газа.

Ответы: а) в 1,30 раза; б) 0,381

10-8. Один моль озона O_3 нагревают до такой степени, что возбуждаются все колебательные степени свободы.

а) Во сколько раз; б) на сколько увеличится показатель адиабаты газа, если все молекулы диссоциируют (распадутся на отдельные атомы)?

Ответы: а) в 1,43 раза; б) 0,5

10-9. В одном сосуде находится один моль криптона Kr при температуре T_1. В другом сосуде – два моля азота N_2 при температуре T_2. На сколько килоджоулей внутренняя энергия азота больше, чем внутренняя энергия криптона? Универсальная газовая постоянная R = 8,31 Дж/моль·К. T_1 = 300 К; T_2 = 400 К. Колебательные степени свободы газов не возбуждены.

Ответ: 12,9 кДж