Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Восточно-Сибирский государственный
технологический университет»
(ГОУ ВПО ВСГТУ)

ФИЗИКА №4
(Термодинамика и статистическая физика)

Методические указания и контрольные задания
для студентов заочного обучения

Составитель: Шелкунова З.В.
Санеев Э.Л.

Улан-Удэ
Издательство ВСГТУ
2010

Аннотация

Методическое указания и контрольные задания для студентов заочного обучения инженерно-технических и технологических специальностей. Содержат разделы программ ”Статистическая физика”, ”Термодинамика”, примеры решения типовых задач и варианты контрольных заданий.

Ключевые слова: Внутренняя энергия, теплота, работа; изопроцессы, энтропия: функции распределения: Максвелла, Больцмана, Бозе – Эйнштейна; Ферми – Дирака; Энергия Ферми, теплоемкость, характеристическая температура Эйнштейна и Дебая.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Тема 1

Динамические и статистические закономерности в физике. Термодинамический и статистический методы. Элементы молекулярно-кинетической теории. Макроскопическое состояние. Физические величины и состояния физических систем. Макроскопические параметры как средние значения. Тепловое равновесие. Модель идеального газа. Уравнение состояния идеального газа. Понятие о температуре.

Тема 2

Явления переноса. Диффузия. Теплопроводность. Коэффициент диффузии. Коэффициент теплопроводности. Температуропроводность. Диффузия в газах, жидкостях и твердых телах. Вязкость. Коэффициент вязкости газов и жидкостей.

Тема 3

Элементы термодинамики. Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия. Интенсивные и экстенсивные параметры.

Тема 4

Обратимые и необратимые процессы. Энтропия. Второе начало термодинамики. Термодинамические потенциалы и условия равновесия. Химический потенциал. Условия химического равновесия. Цикл Карно.

Тема 5

Функции распределения. Микроскопические параметры. Вероятность и флуктуации. Распределение Максвелла. Средняя кинетическая энергия частицы. Распределение Больцмана. Теплоемкость многоатомных газов. Ограниченность классической теории теплоемкости.

Тема 6
Распределение Гиббса. Модель системы в термостате. Каноническое распределение Гиббса. Статистический смысл термодинамических потенциалов и температуры. Роль свободной энергии.

Тема 7
Распределение Гиббса для системы с переменным числом частиц. Энтропия и вероятность. Определение энтропии равновесной системы через статистический вес микросостояния.

Тема 8
Функции распределения Бозе и Ферми. Формула Планка для разновесного теплового излучения. Порядок и беспорядок в природе. Энтропия как количественная мера хаотичности. Принцип возрастания энтропии. Переход от порядка к беспорядку о состоянии теплового равновесия.

Тема 9
Экспериментальные методы исследования колебательного спектра кристаллов. Понятие о фононах. Законы дисперсии для акустических и оптических фононов. Теплоемкость кристаллов при низких и высоких температурах. Электронные теплоемкость и теплопроводность.

Тема 10
Электроны в кристаллах. Приближение сильной и слабой связи. Модель свободных электронов. Уровень Ферми. Элементы зонной теории кристаллов. Функция Блоха. Зонная структура энергетического спектра электронов.

Тема 11
Поверхность Ферми. Число и плотность числа электронных состояний в зоне. Заполнения зон: металлы, диэлектрики и

полупроводники. Электропроводность полупроводников. Понятие о дырочной проводимости. Собственные и примесные полупроводники. Понятие о p-n переходе. Транзистор.

Тема 12

Электропроводность металлов. Носители тока в металлах. Недостаточность классической электронной теории. Электронный ферми-газ в металле. Носители тока как квазичастицы. Явление сверхпроводимости. Куперовское спаривание электронов. Туннельный контакт. Эффект Джозефсона и его применение. Захват и квантование магнитного потока. Понятие о высокотемпературной проводимости.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Основные формулы

1. Количество вещества однородного газа (в молях):

$$\nu = \frac{N}{N_A}, \text{ или } \nu = \frac{m}{\mu},$$

где N-число молекул газа; N_A- число Авогадро; m-масса газа; μ-молярная масса газа.

Если система представляет смесь нескольких газов, то количество вещества системы

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \ldots + \nu_n = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \ldots + \frac{N_n}{N_A},$$

или

$$\nu = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \ldots + \frac{m_n}{\mu_n},$$

где ν_i, N_i, m_i, μ_i -соответственно количество вещества, число молекул, масса, молярная масса i-й компоненты смеси.

2. Уравнение Клапейрона-Менделеева (уравнение состояния идеального газа):

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

где m - масса газа; μ - молярная масса; R - универсальная газовая постоянная; $\nu = m/\mu$ - количество вещества; T-термодинамическая температура Кельвина.

3. Опытные газовые законы, являющиеся частными случаями уравнения Клапейрона-Менделеева для изопроцессов:

а) закон Бойля-Мариотта

(изотермический процесс - T=const; m=const):

$$pV = const,$$

или для двух состояний газа:

$$p_1V_1 = p_2V_2,$$

где p_1 и V_1 - давление и объем газа в начальном состоянии; p_2 и V_2 - те же величины в конечном состоянии;

b) закон Гей-Люссака (изобарический процесс - $p=const$, $m=const$):

$$\frac{V}{T} = const,$$

или для двух состояний:

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

где V_1 и T_1 - объем и температура газа в начальном состоянии; V_2 и T_2 - те же величины в конечном состоянии;

c) закон Шарля (изохорический процесс - $V=const$, $m=const$):

$$\frac{p}{T} = const,$$

или для двух состояний:

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

где p_1 и T_1 - давление и температура газа в начальном состоянии; p_2 и T_2 - те же величины в конечном состоянии;

d) объединенный газовый закон ($m=const$):

$$\frac{pV}{T} = const, \quad \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2},$$

где p_1, V_1, T_1 - давление, объем и температура газа в начальном состоянии; p_2, V_2, T_2 - те же величины в конечном состоянии.

4. Закон Дальтона, определяющий давление смеси газов:

$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_n$$

где p_i - парциальные давления компонент смеси; n - число компонентов смеси.

5. Молярная масса смеси газов:

$$\mu = \frac{m_1 + m_2 + \ldots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \ldots + \nu_n}$$

где m_i - масса i-го компонента смеси; $\nu_i = m_i/\mu_i$ - количество вещества i-го компонента смеси; n - число компонентов смеси.

6. Массовая доля ω_i i-го компонента смеси газа (в долях единицы или процентах):

$$\omega_i = \frac{m_i}{m},$$

где m - масса смеси.

7. Концентрация молекул (число молекул в единице объема):

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A}{\mu}\rho,$$

где N-число молекул, содержащихся в данной системе; ρ - плотность вещества. Формула справедлива не только для газов, но и для любого агрегатного состояния вещества.

8. Основное уравнение кинетической теории газов:

$$p = \frac{2}{3}n\langle\omega\rangle,$$

где $\langle\omega\rangle$ - средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы.

9. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы:

$$\langle\omega\rangle = \frac{3}{2}kT,$$

где k - постоянная Больцмана.

10. Средняя полная кинетическая энергия молекулы:

$$\langle\omega_i\rangle = \frac{i}{2}kT,$$

где i - число степеней свободы молекулы.

11. Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

$$p = nkT.$$

12. Скорости молекул:

средняя квадратичная $\langle v_{\text{к в}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_i}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$;

средняя арифметическая $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_i}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$;

наиболее вероятная $v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_i}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$,

где m_i - масса одной молекулы.

13. Относительная скорость молекулы:

$$u = v/\, v_в,$$

где v - скорость данной молекулы.

14. Удельные теплоемкости газа при постоянном объеме (c_v) и при постоянном давлении (c_p):

$$c_v = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{\mu}\ ; \quad c_p = \frac{i+2}{2} \cdot \frac{R}{\mu}.$$

15. Связь между удельной (c) и молярной (C) теплоемкостями:

$$c = \frac{C}{\mu}; \quad C = c \cdot \mu.$$

16. Уравнение Роберта Майера:

$$C_p - C_v = R.$$

17. Внутренняя энергия идеального газа:

$$U = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} RT = \frac{m}{\mu} C_V T.$$

18. Первое начало термодинамики:

$$\delta Q = dU + \delta A,$$

где δQ - теплота, сообщенная системе (газу); dU - изменение внутренней энергии системы; δA - работа, совершенная системой против внешних сил.

19. Работа расширения газа:

в общем случае $A = \int\limits_{V_1}^{V_2} pdV$;

при изобарическом процессе $A = p(V_2 - V_1)$;

изотермическом процессе $A = \frac{m}{\mu} RT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$;

при адиабатическом процессе $A = -\Delta U = -\frac{m}{\mu} C_v \Delta T$,

или $A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \cdot \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$,

где $\gamma = c_p / c_v$ - показатель адиабаты.

20. Уравнения Пуассона, связывающие параметры идеального газа при адиабатическом процессе:

$$pV^{\gamma} = const; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}};$$

21. Термический к.п.д. цикла:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}; \quad \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Основные формулы

1. Распределение Больцмана (распределение частиц в силовом поле)

$$n = n_0\, e^{-U/(kT)},$$

где n - концентрация частиц; U - их потенциальная энергия; n_0 -концентрация частиц в точках поля, где U=0; k - постоянная Больцмана; T - термодинамическая температура; e - основание натуральных логарифмов.

2. Барометрическая формула (распределение давления в однородном поле силы тяжести)

$$p = p_0 e^{-mg_z/(kT)}, \text{ или } \; p = p_0 e^{-Mg_z/(RT)},$$

где p - давление газа; m - масса частицы; M - молярная масса; z - координата (высота) точки по отношению к уровню, принятому за нулевой; p_0 - давление на этом уровне; g - ускорение свободного падения; R - молярная газовая постоянная.

3. Вероятность того, что физическая величина x, характеризующая молекулу, лежит в интервале значений от x до $x+dx$, определяется по формуле

$$dW(x) = f(x)dx^{*} ,$$

где $f(x)$ - функция распределения молекул по значениям данной физической величины x (плотность вероятности).

4. Количество молекул, для которых физическая величина x, характеризующая их, заключена в интервале значений от x до $x+dx$,

$$dN = N \cdot dW(x) = N \cdot f(x)dx.$$

5. Распределение Максвелла (распределение молекул по скоростям) выражается двумя соотношениями:

а) число молекул, скорости которых заключены в пределах от v до $v+dv$,

$$dN(v) = Nf(v)dv = 4\pi N\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-mv^2/(2kT)} v^2 dv,$$

где *f(v)* - функция распределения молекул по модулям скоростей, выражающая отношение вероятности того, что скорость молекулы лежит в интервале от v до $v+dv$, к величине этого интервала, а также долю числа молекул, скорости которых лежат в указанном интервале; N - общее число молекул; m - масса молекулы;

b) число молекул, относительные скорости которых заключены в пределах от u до $u+du$

$$dN(u) = Nf(u)du = \frac{4}{\sqrt{\pi}} Ne^{-u^2} u^2 du,$$

где $u=v/v_в$ - относительная скорость, равная отношению скорости v к наивероятнейшей скорости $v_в$; *f(u)* - функция распределения по относительным скоростям.

6. Распределение молекул по импульсам. Число молекул, импульсы которых заключены в пределах от p до $p+dp$,

$$dN(p) = Nf(p)dp = 4\pi N\left(\frac{1}{2\pi \cdot m \cdot k \cdot T}\right)^{3/2} e^{-(p^2)/(2mkT)} p^2 dp,$$

где *f(p)* - функция распределения по энергиям.

7. Распределение молекул по энергиям. Число молекул, энергии которых заключены в интервале от ε до ε+dε,

$$dN(\varepsilon) = Nf(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N \frac{e^{-\varepsilon/(kT)}}{(kT)^{3/2}} \varepsilon^{1/2} d\varepsilon,$$

где *f(ε)* - функция распределения по энергиям.

8. Среднее значение физической величины x в общем случае

$$\langle x \rangle = \frac{\int xf(x)dx}{f(x)dx},$$

а в том случае, если функция распределения нормирована на единицу,

$$\langle x \rangle = \int xf(x)dx,$$

где *f(x)* - функция распределения, а интегрирование ведется по всей совокупности изменений величины *x*.

Например, среднее значение скорости молекулы (т.е. средняя арифметическая скорость) $\langle v \rangle = \int\limits_0^\infty vf(v)dv$;

средняя арифметическая скорость $\langle v_{кв} \rangle = \langle v^2 \rangle^{1/2}$, где $\langle v^2 \rangle = \int\limits_0^\infty v^2 f(v)dv$; средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы $\langle \varepsilon \rangle = \int\limits_0^\infty \varepsilon \cdot f(\varepsilon)d\varepsilon$.

9. Среднее число соударений, испытываемых одной молекулой газа в единицу времени,

$$\langle z \rangle = \sqrt{2}\pi d^2 n \langle v \rangle,$$

где *d* - эффективный диаметр молекулы; *n* - концентрация молекул; <*v*> - средняя арифметическая скорость молекул.

10. Средняя длина свободного пробега молекул газа

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}.$$

11. Импульс (количество движения), переносимый молекулами из одного слоя газа в другой через элемент поверхности,

$$dp = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S dt,$$

где η - динамическая вязкость газа; $\dfrac{dv}{dz}$ - градиент (поперечный) скорости течения его слоев; ΔS - площадь элемента поверхности; dt - время переноса.

12. Динамическая вязкость

$$\eta = \frac{1}{3}\rho\langle v\rangle\langle l\rangle,$$

где ρ -плотность газа (жидкости); <v> - средняя скорость хаотического движения его молекул; <l> - их средняя длина свободного пробега.

13. Закон Ньютона.

$$F = \frac{dp}{dt} = \eta\frac{dv}{dz}\Delta S \ ,$$

где F - сила внутреннего трения между движущимися слоями газа.

14. Закон Фурье.

$$\Delta Q = -\lambda\frac{dT}{dx}S\Delta t,$$

где ΔQ - теплота, прошедшая посредством теплопроводности через сечение площадью S за время Δt; λ - теплопроводность; dT/dx - градиент температуры.

15. Теплопроводность (коэффициент теплопроводности) газа

$$\lambda = \frac{1}{3}c_V\rho\langle v\rangle\langle l\rangle, \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{1}{6}k\cdot n\langle v\rangle\langle l\rangle,$$

где c_V - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; ρ - плотность газа; <v> - средняя арифметическая скорость его молекулы; <l> - средняя длина свободного пробега молекул.

16. Закон Фика

$$\Delta m = -D\frac{dn}{dx}m_1 S\Delta t \ ,$$

где Δm - масса газа, перенесенная в результате диффузии через поверхность площадью S за время Δt; D - диффузия (коэффициент диффузии); *dn/dx* - градиент концентрации молекул; m_1 - масса одной молекулы.

17. Диффузия (коэффициент диффузии)

$$D = \frac{1}{3}\langle v\rangle\langle l\rangle .$$

18. Распределение Ферми по энергиям для свободных электронов в металле при T ≠0

$$dn(E) = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m}{h^2}\right)^{3/2}\frac{E^{1/2}dE}{\exp\left(E - E_f/kt\right)+1}$$

19. Функция распределения Ферми-Дирака

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(E - E_f/kt\right)+1}$$

20. Распределение по энергиям для свободных электронов при T = 0 K, E < E_f

$$dn(E) = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m}{h^2}\right)^{3/2}E^{1/2}dE$$

21. Уровень Ферми в металле при T = 0

$$E_f = \frac{h^2}{2m}\left(3\pi^2 n_0\right)^{2/3}$$

22. Температура вырождения

$$T_{\hat{e}\eth} = \frac{2\pi h^2}{km}n_0^{2/3}$$

ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА

Основные формулы

1. Молярная внутренняя энергия химически простых (состоящих из одинаковых атомов) твердых тел в классической теории теплоемкости выражается формулой

$$U_m=3RT,$$

где R -молярная газовая постоянная; T - термодинамическая температура.

2. Теплоемкость C системы (тела) при постоянном объеме определяется как производная от внутренней энергии U по температуре, т.е.

$$C = dU/dT.$$

3. Закон Дюлонга и Пти. Молярная теплоемкость C_m химически простых твердых тел

$$C_m = 3R.$$

4. Закон Неймана-Коппа. Молярная теплоемкость химически сложных тел (состоящих из различных атомов)

$$C_m = n \cdot 3R,$$

где n - общее число частиц в химической формуле соединения.

5. Среднее значение энергии $\langle \varepsilon \rangle$ квантового осциллятора, приходящейся на одну ступень свободы, в квантовой теории Эйнштейна выражается формулой

$$\langle \varepsilon \rangle = \varepsilon_0 + \frac{\hbar\omega}{\exp\left[\hbar\omega / (kT)\right] - 1},$$

где ε_0 - нулевая энергия $\left(\varepsilon_0 = {}^1\!/_2\,\hbar\omega\right)$; $\hbar$ - постоянная Планка; ω - круговая частота колебаний осциллятора; k - постоянная Больцмана; T - термодинамическая температура.

6. Молярная внутренняя энергия кристалла в квантовой теории теплоемкости Эйнштейна определяется по формуле

$$U_m = U_{m0} + 3R\frac{\theta_E}{\exp\left(\theta_E/T\right) - 1},$$

где $U_{m0}=3/2\ R\theta_E$ - молярная нулевая энергия по Эйнштейну; $\theta_E = \hbar\omega / k$ - характеристическая температура Эйнштейна.

7. Молярная теплоемкость кристалла в квантовой теории теплоемкости Эйнштейна

$$C_m = 3R\left(\frac{\theta_E}{T}\right)^2 \frac{\exp\left(\theta_E/T\right)}{\left(\exp\left(\theta_E/T\right) - 1\right)^2}.$$

При низких температурах ($T<<\theta_E$)

$$C_m = 3R(\theta_E/T)\exp(-\theta_E/T).$$

8. Частотный спектр колебаний в квантовой теории теплоемкости Дебая задается функцией распределения частот $g(\omega)$. Число dZ собственных частот тела, приходящихся на интервал частот от ω до $\omega+d\omega$, определяется выражением

$$dZ = g(\omega)dv.$$

Для трехмерного кристалла, содержащего N атомов,

$$dZ = \frac{gN}{\omega_{\max}^3}\omega^2 d\omega,$$

где $\omega_{\max}$ -максимальная частота, ограничивающая спектр колебаний.

9. Энергия U твердого тела связана с средней энергией $\langle\varepsilon\rangle$ квантового осциллятора и функцией распределения частот $g(\omega)$ соотношением

$$U = \int_0^{\omega_{\max}} \langle\varepsilon\rangle g(\omega)d\omega.$$

10. Молярная внутренняя энергия кристалла по Дебаю

$$U_m = U_{m0} + 3RT \cdot 3\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^2}{\exp(x)-1}\,dx,$$

где $U_{m0} = {}^9\!/_8\, R\theta_D$ - молярная нулевая энергия кристалла по Дебаю; $\theta_D = \hbar\omega_{\max}/k$ - характеристическая температура Дебая.

11. Молярная теплоемкость кристалла по Дебаю

$$C_m = 3R\left[12\left({}^{T}\!/_{\theta_D}\right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3dx}{\exp(x)-1} - \frac{3\left({}^{\theta_D}\!/_{T}\right)}{\exp\left({}^{\theta_D}\!/_{T}\right)-1}\right].$$

Предельный закон Дебая. В области низких температур ($T \ll \theta_D$) последняя формула принимает вид

$$C_m = \frac{12\pi^3}{5} R\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3.$$

12. Энергия ε фонона связана с круговой частотой ω колебаний классической волны соотношением

$$\varepsilon = \hbar \cdot \omega.$$

13. Квазиимпульс фонона

$$p = 2\pi \cdot \hbar / \lambda.$$

14. Скорость фонона является групповой скоростью звуковых волн в кристалле

$$u = d\varepsilon/dp.$$

При малых значениях энергии фонона дисперсией волн можно пренебречь и тогда групповая и фазовая скорости совпадут:

$$u = v = \varepsilon/p.$$

Скорости продольных (v_l) и поперечных (v_t) волн в кристалле определяются по формулам

$$v_l = \sqrt{{}^{E}\!/_{\rho}}, \quad v_t = \sqrt{{}^{G}\!/_{\rho}},$$

где E и G - модули соответственно продольной и поперечной упругости.

Усредненное значение скорости звука v связано с v_l и v_t соотношением

$$\frac{3}{v^3} = \frac{2}{v_t^3} + \frac{1}{v_l^3}.$$

15. Закон Фурье. Количество теплоты dQ, перенесенное через поверхность площадью S, перпендикулярную направлению теплового потока, за время dt, равно

$$dQ = -\lambda \left(dT/dx \right) S dt,$$

где λ - теплопроводность; dT/dx - градиент температуры. Знак минус в формуле показывает, что направление теплового потока противоположно вектору градиента температуры.

16. Теплопроводность λ, теплоемкость С, рассчитанная на единицу объема, скорость v звука (усредненное значение) и средняя длина свободного пробега Λ фононов связаны соотношением

$$\lambda = {}^{1}\!/_{3}\, C \cdot v \cdot \Lambda.$$

17. Относительное изменение частоты, обусловленное эффектом Доплера,

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{v}{c} \cos\vartheta \qquad (v << c),$$

где v - скорость атома; c - скорость распространения электромагнитного излучения; ϑ - угол между вектором $\mathbf{v}$ и направлением наблюдения (от атома к наблюдателю).

18. Энергия отдачи ядра при испускании гамма-фонона

$$R = (\hbar\omega)^2 / \left(2 m_я c^2\right),$$

где $\hbar \cdot \omega$ - энергия гамма-фонона; $m_я$ - масса ядра.

19. Естественная ширина спектральной линии

$$\Gamma = {}^{h}\!/_{\tau},$$

где τ - среднее время жизни ядра(атома) в возбужденном состоянии.

20. Сила $f(x)$, возвращающая частицу в положение равновесия при ангармонических колебаниях, определяется выражением

$$f(x) = -\beta \cdot x + \gamma \cdot x^2,$$

где β - коэффициент гармоничности, связанный с равновесным расстоянием r_0 между атомами кристалла и модулем продольной упругости E соотношением

$$\beta = r_0 E;$$

γ -коэффициент ангармоничности, характеризующий ассиметрию колебаний атомов в твердом теле. Для оценки по порядку величин можно принять

$$\gamma = \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta}{r_0}.$$

21. Коэффициент линейного расширения, по определению,

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}.$$

Теоретически он выражается через коэффициенты β и γ формулой $\alpha = \dfrac{\gamma \cdot k}{\beta^2 r_0}$, или приближенно $\alpha = \dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{k}{r_0^2 \beta^2}$, где k - постоянная Больцмана.

Примеры решения задач

Пример 1. Определить число N молекул, содержащихся в объеме V=1 мм^3 воды, и массу m_1 молекулы воды. Считая условно, что молекулы воды имеют вид шариков, соприкасающихся друг с другом, найти диаметр d молекул.

Решение. Число n молекул, содержащихся в некоторой массе m, равно произведению числа Авогадро N_A на количество вещества ν:

$$N = \nu N_A.$$

Так как количество вещества

$$\nu = m/\mu,$$

где μ - молярная масса, то

$$N = \frac{m}{\mu} N_A.$$

Выразив в этой формуле массу как произведение плотности на объем V, получим

$$N = \frac{\rho \cdot V}{\mu} N_A \qquad (1)$$

Подставим в формулу (1) следующие значения величин: ρ=10^3 кг/м^3; V= 1 мм^3=10^{-9} м^3; μ=18·10^{-3} кг/моль; N_A=6,02·10^{23} моль$^{-1}$ и произведем вычисления:

$$N = \frac{10^3 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot 10^{-3}} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ молекул} = 3{,}34 \cdot 10^{19} \text{ молекул}.$$

Массу m_1 одной молекулы можно найти делением молярной массы на число Авогадро:

$$m_1 = \frac{\mu}{N_A}.$$

Подставив сюда числовые значения μ и N, найдем массу молекулы воды:

$$m_1 = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{6{,}02 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = 2{,}99 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

Если молекулы воды, плотно прилегают друг к другу, то можно считать, что на каждую молекулу приходится объем (кубическая ячейка) $V_1 = d^3$, где d - диаметр молекулы. Отсюда

$$d = \sqrt[3]{V_1}\ . \qquad (2)$$

Объем V_1 найдем, разделив молярный объем V_μ на число молекул в моле, т.е. на число Авогадро N_A:

$$V_1 = V_\mu / N_A.$$

Подставим полученное выражение V_1 в формулу (2):

$$d = \sqrt[3]{V_\mu / N_A}\ .$$

Входящий в эту формулу молярный объем определяется выражением $V_\mu = \mu / \rho$. Тогда искомый диаметр молекулы

$$d = \sqrt[3]{\mu / \rho N_A} \qquad (3)$$

Проверим, дает ли правая часть выражения (3) единицу длины:

$$[d] = \left\{ \frac{[\mu]}{[\rho][N_A]} \right\}^{1/3} = \left\{ \frac{1 \text{ кг}/\text{моль}}{1 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 1 \text{моль}^{-1}} \right\}^{1/3} = 1 \text{ м}.$$

Теперь подставим числовые значения физических величин в формулу (3) и произведем вычисления:

$$d = \sqrt[3]{\frac{18 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}}} \text{ м} = 3{,}11 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 311 \text{ пм}.$$

Пример 2. В баллоне объемом V = 10 л находится гелий под давлением p_1=1 МПа и при температуре T_1 = 300 К. После того как из баллона было взято

m=10 г гелия, температура в баллоне понизилась до T_2=290 К. Определить давление p_2 гелия, оставшегося в баллоне.

Решение. Для решения задачи воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона, применив его к конечному состоянию газа:

$$p_2 V = \frac{m_2}{\mu} R T_2, \qquad (1)$$

где m_2-масса гелия в баллоне в конечном состоянии; μ - молярная масса гелия; R - молярная газовая постоянная.

Из уравнения (1) выразим искомое давление p_2:

$$p_2 = \frac{m_2}{\mu} \cdot \frac{R T_2}{V}. \qquad (2)$$

Массу гелия m_2 выразим через массу m_1, соответствующую начальному состоянию, и массу m гелия, взятого из баллона:

$$m_2 = m_1 - m. \qquad (3)$$

Массу гелия m_1 найдем также из уравнения Менделеева-Клапейрона, применив его к начальному состоянию:

$$m_1 = \frac{\mu \cdot p_1 V}{R T_1}. \qquad (4)$$

Подставляя в выражение (3) массу m_1 из формулы (4), а затем полученное выражение m_2 в формулу (2), найдем

$$p_2 = \left(\frac{\mu \cdot p_1 V}{R T_1} - m \right) \frac{R T_2}{\mu V},$$

или после преобразования и сокращения

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 - \frac{m}{\mu} \cdot \frac{R T}{V}. \qquad (5)$$

Пример 3. Баллон содержит m_1=80 кг кислорода и m_2=320 г аргона. Давление смеси p=1 МПа, температура T=300 К. Принимая данные газа за идеальные, определить объем V баллона.

Решение. По закону Дальтона, давление смеси равно сумме парциальных давлений газов, входящих в состав смеси. Парциальным давлением газа называется давление, которое производил бы этот газ, если бы только он один находился в сосуде, занятом смесью.

По уравнению Менделеева-Клапейрона, парциальные давления кислорода p_1 и аргона p_2 выражаются формулами:

$$p_1 = \frac{m_1}{\mu_1}\frac{RT}{V}; \qquad p_2 = \frac{m_2}{\mu_2}\frac{RT}{V} \; .$$

Следовательно, по закону Дальтона давление смеси газов

$$p = p_1 + p_2, \text{ или } \quad p = \frac{m}{} \quad \frac{m}{} \quad \frac{RT}{V},$$

откуда объем баллона

$$V = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}\right)\frac{RT}{p} \qquad (1)$$

Выразим в единицах СИ числовые значения величин, входящих в формулу: m_1=80 г=0,08 кг, $\mu_1=32\cdot\cdot10^{-3}$ кг/моль, m_2=320 г=0,32 кг, $\mu_2=40\cdot10^{-3}$ кг/моль, p=1 МПа=10^6 Па, R=8,31 Дж/(моль·К).

Подставим числовые значения в формулу (1) и произведем вычисления:

$$V = \left(\frac{0{,}08}{32\cdot10^{-3}} + \frac{0{,}32}{40\cdot10^{-3}}\right)\cdot\frac{831\cdot300}{10^6}\,м^3 =$$

$$= 0{,}0262\,м^2 = 26{,}2\,л.$$

Пример 4. Вычислить удельные теплоемкости c_V и c_p смеси неона и водорода, если массовая доля неона w_2=20 %. Значения удельных теплоемкостей газов взять из предыдущего примера.

Решение. Удельную теплоемкость смеси при постоянном объеме c_v найдем следующим образом. Теплоту, необходимую для нагревания смеси на ΔT, выразим двумя способами:

$$Q=c_V(m_1+m_2)\Delta T, \qquad (1)$$

$$Q=(c_{V,1}m_1+c_{V,2}m_2)\Delta T, \qquad (2)$$

где $c_{V,1}$ - удельная теплоемкость неона; $c_{V,2}$ - удельная теплоемкость водорода.

Приравняв правые части (1) и (2) и разделив обе части полученного равенства на ΔT, получим

$$c_V(m_1+m_2)=c_{V,1}\, m_1+c_{V,2}\, m_2,$$

откуда

$$c_V = c_{V,1}\frac{m_1}{m_1+m_2} + c_{V,2}\frac{m_2}{m_1+m_2}, \qquad (3)$$

или

$$c_V = c_{V,1}\, w_1+c_{V,2}\, m_2, \qquad (4)$$

где $w_1 = \dfrac{m_1}{m_1+m_2}$ и $w_2 = \dfrac{m_2}{m_1+m_2}$ - массовые доли неона и водорода в смеси.

Подставив в формулу (4) числовые значения величин, найдем:

$$c_V = (6{,}24\cdot 10^2\cdot 0{,}8+1{,}04\cdot 10^4\cdot 0{,}2)\ \text{Дж/(кг·К)} =$$
$$= 2{,}58\cdot 10^3\ \text{Дж/(кг·К)}.$$

Рассуждая таким же образом, получим формулу для вычисления удельной теплоемкости смеси при постоянном давлении:

$$c_p = c_{p,1}\, w_1 + c_{p,2}\, w_2. \qquad (5)$$

Подставим в формулу (5) числовые значения величин:

c_p= $1{,}04\cdot 10^3\cdot 0{,}8+1{,}46\cdot 10^4\cdot 0{,}2$ Дж/(кг·К)=$3{,}75\cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

Пример 5. Кислород массой m=2 кг занимает объем V_1=1 м^3 и находится под давлением p_1=0,2 МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема V_2=3 м^3, а затем при постоянном объеме до давления p_3=0,5 МПа. Найти изменение ΔU внутренней энергии газа, совершенную им работу A и теплоту Q, переданную газу. Построить график процесса.

Решение. Изменение внутренней энергии газа выражается формулой

$$\Delta U = c_V m \Delta T = \frac{i}{2}\frac{R}{\mu} m \Delta T \qquad (1)$$

где i-число степеней свободы молекул газа (для двухатомных молекул кислорода i=5); μ-молярная масса.

Начальную и конечную температуру газа найдем из уравнения Клапейрона-Менделеева $pV = \frac{m}{\mu} RT$:

$$T = \frac{pV\mu}{mR}. \qquad (2)$$

Выпишем заданные величины в единицах СИ: m=2 кг, $\mu=32\cdot10^{-3}$ кг/моль, R=8,31 Дж/(моль·К), V_1=1 м^3, $V_2=V_3$=3 м^3, $p_1=p_2$=0,2 МПа=$2\cdot10^5$ Па, p_3=0,5 Мпа =
=$5\cdot10^5$ Па. Подставляя эти значения в выражение (2) и выполняя арифметические действия, получим:

$$T_1 = \frac{2\cdot10^5\cdot1\cdot32\cdot10^{-3}}{2\cdot8{,}31}\text{ К} = 385\text{ К};$$

$$T_2 = \frac{2\cdot10^5\cdot3\cdot32\cdot10^{-3}}{2\cdot8{,}31}\text{ К} = 1155\text{ К} = 1{,}16\text{ кК};$$

$$T_3 = \frac{5\cdot10^5\cdot3\cdot32\cdot10^{-3}}{2\cdot8{,}31}\text{ К} = 2887\text{ К} = 2{,}89\text{ кК}.$$

Подставляя в выражение (1) числовые значения величин, входящих в него, и выполняя арифметические действия, находим

$$\Delta U = \frac{5}{2}\cdot\frac{8{,}31}{32\cdot10^{-3}}\cdot2(2887-385)\text{ Дж} = 3{,}24\cdot10^6\text{ Дж} = 3{,}24\text{ МДж}$$

Работа расширения газа при постоянном давлении выражается формулой $A = R\dfrac{m}{\mu}\Delta T$.

Подставив числовые значения величин, получим

$$A_1 = 8{,}31 \cdot \frac{2}{32 \cdot 10^{-3}} \cdot (1155 - 385)\ \text{Дж} = 0{,}400 \cdot 10^6\ \text{Дж}.$$

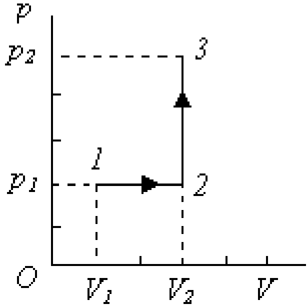

Рис. 1

Работа газа, нагреваемого при постоянном объеме, равна нулю, т.е. A_2=0. Следовательно, полная работа, совершенная газом, равна

$A=A_1+A_2=0{,}4 \cdot 10^6$ Дж.

Согласно первому началу термодинамики, теплота Q, переданная газу, равна сумме изменения внутренней энергии ΔU и работы A: $Q = \Delta U+A$, следовательно,

$Q=0{,}4 \cdot 10^6$ Дж$+3{,}24 \cdot 10^6$ Дж$=3{,}64 \cdot 10^6$ Дж=3,64 МДж.

График процесса приведен на рис.1.

Пример 6. В цилиндре под поршнем находится водород массой m=0,02 кг при температуре T=300 К. Водород сначала расширился адиабатически, увеличив свой объем в n_1=5 раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в n_2=5 раз. Найти температуру в конце адиабатического расширения и работу, совершенную газом при этих процессах. Изобразить процесс графически.

Решение. Температуры и объемы газа, совершающего адиабатический процесс, связаны между собой соотношением

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma - 1}, \text{ или } \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{n^{\gamma - 1}},$$

где γ-отношение теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме (для водорода как двухатомного газа γ=1,4):

$$n_1 = V_2/V_1 = 5.$$

Отсюда получаем следующее выражение для конечной температуры T_2:

$$T_2 = \frac{T_1}{n_1^{\gamma - 1}}.$$

Подставляя числовые значения заданных величин, находим

$$T_2 = \frac{300}{5^{1,4-1}} K = \frac{300}{5^{0,4}} K.$$

Так как $5^{0,4}$=1,91 (находится логарифмированием), то

$$T_2 = \frac{300}{1,91} \text{ К} = 157 \text{ К}.$$

Работа A_1 газа при адиабатическом расширении может быть определена по формуле

$$A_1 = \frac{m}{\mu} C_v \left(T_1 - T_2\right) = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} R\left(T_1 - T_2\right),$$

где C_v - молярная теплоемкость газа при постоянном объеме.

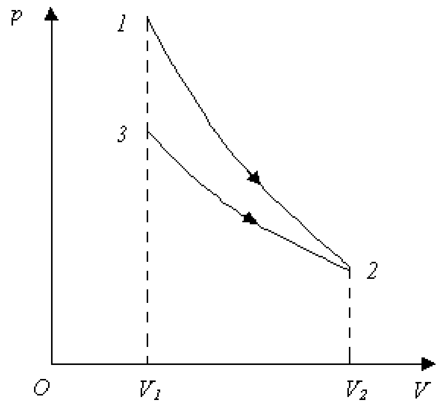

Рис. 2

Подставив числовые значения величин: R=8,31 Дж/(моль·К), i=5 (для водорода как двухатомного газа), $\mu=2\cdot10^{-3}$ кг/моль, m=0,02 кг, T_1=300 К, T_2=157 К в правую часть последней формулы и выполняя арифметические действия, получим

$$A_1=\frac{0{,}02\cdot5\cdot8{,}31}{2\cdot10^{-3}\cdot2}\left(300-157\right)\text{ Дж}=2{,}98\cdot10^4\text{ Дж.}$$

Работа A_2 газа при изотермическом процессе может быть выражена в виде

$$A_2=\frac{m}{\mu}RT_2\ln\frac{V_3}{V_2},\ \text{или}\quad A_2=\frac{m}{\mu}RT_2\ln\frac{1}{n_2},$$

где $n_2=V_2/V_3=5$.

Подставляя известные числовые значения величин, входящих в правую часть этого равенства, и выполняя арифметические действия, находим

$$A_2=\frac{0{,}02}{2\cdot10^{-3}}\cdot8{,}31\cdot157\ln\frac{1}{5}\text{ Дж}==-2{,}10\cdot10^4\text{ Дж.}$$

Знак “минус” показывает, что работа совершается над газом внешними силами. График процесса приведен на рис.2

Пример 7. Тепловая машина работает по обратимому циклу Карно. Температура нагревателя T_1=500 К. Определить термический к.п.д. η цикла и температуру T_2 охладителя тепловой машины, если за счет каждого килоджоуля теплоты, полученной от нагревателя, машина совершает работу A=350 Дж.

Решение. Термический к.п.д. тепловой машины, называемый также коэффициентом использования теплоты, показывает, какая доля теплоты, полученной от нагревателя, превращается в механическую работу. Термический к.п.д. выражается формулой

$$\eta = \frac{A}{Q_1},$$

где Q_1 - теплота, полученная от нагревателя; A - работа, совершенная рабочим телом тепловой машины.

Подставив числовые значения в эту формулу, получим

$$\eta = \frac{350}{1000} = 0{,}35.$$

Зная к.п.д. цикла, можно по формуле $\eta = \dfrac{T_1 - T_2}{T_1}$ определить температуру охладителя T_2:

$$T_2 = T_1(1-\eta).$$

Подставив в эту формулу полученное значение к.п.д. и температуры T_1 нагревателя, получим

$$T_2 = 500(1-0{,}35)\ \text{К} = 325\ \text{К}.$$

Пример 8. В сосуде объемом V=30 л находится m=100 г кислорода под давлением $p=3\cdot10^5$ Па. Определить наиболее вероятное значение кинетической энергии молекул O_2.

Решение. Вероятное значение кинетической энергии молекул соответствует максимум кривой распределения Максвелла по кинетическим энергиям

$$f\left(E\right)=2\pi\left(\frac{1}{\pi\cdot kT}\right)^{3/2}E^{1/2}e^{-\frac{E_k}{kT}} \qquad (1)$$

Задача сводится к нахождению экстремума функции $f(E)$.

Определим первую производную $g'(E)$ и приравняем ее нулю, получим

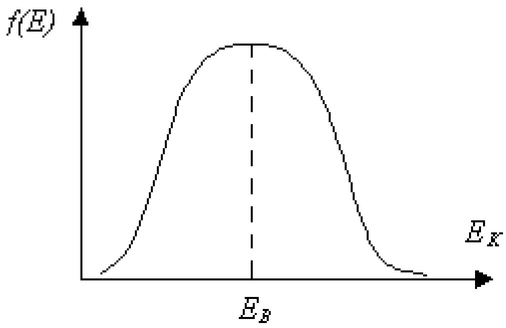

Рис. 3

$$f'\left(E\right)=2\pi\left(\frac{1}{\pi kT}\right)^{3/2}E^{1/2}\left(-\frac{1}{kT}\right)e^{-\frac{E'}{kT}}+$$
$$+2\pi\left(\frac{1}{\pi kT}\right)^{3/2}\frac{1}{2}E^{-1/2}e^{-\frac{E_k}{kT}}=0 \qquad (2)$$

Отсюда $E_в=kT/2$ (3) температуру найдем из уравнения Менделеева-Клайперона

$$T=\frac{pV\mu}{\left(mR\right)} \qquad (4)$$

Подставим (4) в (3) и получим

$$E_в=\frac{k\cdot pV\mu}{2mR}=\frac{pV\mu}{2mN_A}=\frac{3\cdot10^5\cdot30\cdot10^{-3}\cdot32\cdot10^{-3}}{2\cdot10^{-1}\cdot6{,}02\cdot10^{23}}=16\cdot10^{-22}\text{Дж}=$$
$=1{,}6\cdot10^{-21}$ Дж.

Пример 9. Определить массу воздуха в цилиндре с основанием ΔS=1 м^2 и высотой h=1 км. Считать, что воздух находится при нормальных условиях.

Решение. Распределение Больцмана для одномерного случая имеет вид

$$d\omega(x) = \frac{mg}{kT} e^{-U(x)/kT} dx$$

Число молекул dN в слое воздуха толщиной dx на высоте x от поверхности Земли

$$dN(x) = \frac{Nmg}{kT} e^{-mgx/kT} dx$$

Проинтегрировав $dN(x)$ по x в пределах от 0 до h, найдем полное число молекул в данном цилиндре

$$N = \frac{Nmg}{kT} \int_0^h e^{-mgh/kT} dx = N\left(1 - e^{-mgh/kT}\right) = \frac{\Delta S p_0}{mg}\left(1 - e^{-mgh/kT}\right)$$

Умножив N на массу одной молекулы, получим искомую массу

$$m = \frac{\Delta S \cdot p_0}{g}\left(1 - e^{-mgh/kT}\right),$$

$$m = \frac{10^5 \cdot 1}{9{,}8}\left[1 - \exp\left(\frac{mgh}{kT}\right)\right] = \frac{10^5}{9{,}8}\left[1 - \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right)\right] =$$

$$= \frac{10^5}{9{,}8}\left[1 - \exp\frac{29 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}8 \cdot 10^3}{8{,}3 \cdot 273}\right] \approx 10^4 \cdot \left(1 - e^{-0{,}13}\right) \cong 10^3 \text{ кг}$$

Пример 10.

Кислород, масса которого m=20 г, нагревают от температуры t_1=27^{0}С до t_2=127^{0}С. Найти изменение энтропии, если известно что начальное и конечное давление одинаковы и близки к атмосферному.

Решение. Найдем изменение энтропии при изобарическом процессе

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q_p}{T} = \frac{m}{\mu} C_p \int_1^2 \frac{\delta T}{T} = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i+2}{2} R \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$\Delta S = \frac{0{,}2}{32 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{5+2}{2} \cdot 8{,}31 \cdot \ln \frac{400}{300} = 52 \text{ Дж/К}.$$

Пример 11.

Очень небольшой теплоизолированный сосуд разделен на две части, в каждой из которых находится углекислый газ в количестве 10^{-8} моль. Температура газа в одной части t_1=28^{0}С, в другой части t_2=27^{0}С. Определить во сколько раз возрастает вероятность состояния системы при выравнивании температур.

Решение. По соотношению Больцмана

$$\Delta S = S_2 - S_1 = k \cdot \ln \frac{W_2}{W_1},$$

откуда $\dfrac{W_2}{W_1} = \exp\left(\dfrac{\Delta S}{k}\right)$.

В результате теплообмена температура в первой части уменьшается на ΔT, а во второй возрастает на ΔT

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_2}{2}.$$

При выравнивании температур $T'_1 = T'_2$ или $T_1 - \Delta T = T_2 + \Delta T$. Найдем изменение энтропии ΔS учитывая, что объемы 1 и 2 части не изменяются

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{T_1}^{T_1'} \frac{\delta Q_v}{T} + \int_{T_2}^{T_2'} \frac{\delta Q_v}{T}$$

Проинтегрируем с учетом значений T_1' и T_2' и получим

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} C_v \left[\ln\left(1 - \frac{\Delta T}{T_1}\right) + \ln\left(1 + \frac{\Delta T}{T_2}\right) \right]$$

Т.к. $\Delta T << T_2$, то натуральные логарифмы разложенны в ряд и ограничимся первыми членами. Тогда

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T \left(-\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right)$$

$$\Delta S = 1{,}38 \cdot 10^{-12} \text{ Дж/К}$$

Отношение $\frac{W_2}{W_1} = \exp \cdot 10^{11}$.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.

Уравнение состояния идеального газа.

1. В сосуде объемом 0,582 л находится смесь неона и гелия под давлением $1{,}5 \cdot 10^5$ Па. Определить температуру смеси газов, если масса неона 12 г, а масса гелия 10 г.

2. Кислород массой 8 г и $C0_2$ поместили в сосуд объемом $1{,}25 \cdot 10^5$ м^3 при температуре 300 К. Определить массу $C0_2$, если смесь находится под давлением 10^5 Па.

3.Определить объем, занимаемый смесью газов азота (14 г) и кислорода (16 г), если смесь находится при температуре 250 К и давлением $7{,}5 \cdot 10^5$ Па.

4. Крептон массой 6 г и неон массой 5 г поместили в сосуд объемом 4,15 л при температуре 90 К. Под каким давлением находится смесь этих газов?

5. Смесь H_2O и NO_2 поместили в сосуд объемом 0,125 л под давлением $2{,}5 \cdot 10^5$ Па. Определить массу паров H_2O, масса газа $N0_2$ - 11 г, температура смеси - 501 К.

6. Определить плотность смеси углекислого газа и азота при температуре 400 К и давлении $5 \cdot 10^5$ Па. Азот составляет 40 % смеси.

7. В сосуде находятся смесь водорода и аргона. Аргон составляет 60% смеси. Определить плотность смеси газов при температуре 320 К и давлении $2 \cdot 10^5$ Па.

8. Масса кислорода составляет 80 % от общей смеси с гелием. Определить плотность смеси газов при температуре 360 К и давлении $4 \cdot 10^5$ Па.

9. Какова плотность смеси кислорода и паров воды при температуре 340 К и давлении $2{,}5 \cdot 10^5$ Па, если пары воды составляют 20 % от общей массы смеси?

10. Масса кислорода составляет 0,6 от общей смеси с азотом. Определить плотность смеси газов при температуре 300 К и давлении $1{,}5 \cdot 10^5$ Па.

Основное уравнение МКТ. Средняя кинетическая энергия молекул.

11. Газ находится под давлением $5 \cdot 10^5$ Па. При температуре 220 К. Определить концентрацию молекул и среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы.

12. Средняя кинетическая энергия одной молекулы равна $9{,}315 \cdot 10^5$ Дж. Определить под каким давлением находится газ, если концентрация молекул $6{,}44 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$.

13. Газ находится при температуре 250 К. Найти под каким давлением находится газ, если концентрация молекул $1{,}45 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$. Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы.

14. Определить концентрацию молекул, если средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы газа равна $7{,}245 \cdot 10^5$ Дж при давлении $2{,}5 \cdot 10^5$ Па.

15. Аргон массой 5 г находится при температуре 350 К. Определить энергию теплового движения молекул.

16. Какая часть тепловой энергии молекул H_2 массой 5 г приходится на долю вращательного движения, если газ находится при температуре 350 К?

17. Пары воды массой 8 г находятся при температуре 500 К. Какая часть тепловой энергии молекул приходится на долю поступательного движения?

18. Энергия теплового движения молекул кислорода при температуре 300 К равна 390 Дж. Какова масса кислорода?

19. Углекислый газ массой 10 г имеет внутреннюю энергию равную 2550 Дж. При какой температуре находится газ?

20. На долю вращательного движения молекул закиси азота при температуре 250 К приходится 566,6 Дж. Определить массу газа.

Первое начало термодинамики.

21.Газ нагрели на 140 К при постоянном давлении, затратив 2,45 Дж теплоты, затем этот газ охладили при постоянном объеме, на 160 К. Сколько степеней свободы имеет газ, если при охлаждении выделилось 2 Дж теплоты?

22. Молекулы некоторого газа имеют 6 степеней свободы. При нагревании газа при постоянном давлении было затрачено 19,8 Дж теплоты, а при охлаждении при постоянном объеме на 140 К выделилось 26 Дж теплоты. На сколько градусов нагрели газ при постоянном давлении? Масса газа постоянна.

23. Для нагревания идеального газа на 170 К подвели 49,58 Дж теплоты при постоянном, давлении. На сколько градусов охладится газ при постоянном объеме, если при этом выделится 35 Дж теплоты?

24. Сколько теплоты потребуется для нагревания двухатомного газа при постоянном давлении на 60 К, если

при охлаждении той же массы газа на 30 К при постоянном объеме выделится 4 Дж теплоты?

25. Для нагревания многоатомного газа на 200 К при постоянном давлении затратили 51,58 Дж теплоты. Сколько выделится теплоты при охлаждении этой же массы газа на 180 К при постоянном объеме?

26. Азот массой 20 г при температуре 310 К расширился за счет притока теплоты, при постоянном давлении. Найти изменение объема газа и работу его расширения, если изменение внутренней энергии азота в этом процессе равно 1840 Дж.

27. Гелий изотермически расширился при температуре 370 К таким образом, что его давление уменьшилось в 1,5 раза. Найти массу гелия и работу расширения газа, если первоначальный объем гелия равен 2,2 л, а давление - $1{,}8 \cdot 10^5$ Па.

28. Объем углекислого газа, взятого при температуре 340 К, при изобарическом процессе увеличился в 2 раза, а внутренняя энергия изменилась на 9632 Дж. Определить количество теплоты, подведенное газу извне. Какова масса углекислого газа?

29. Неон занимает объем 2,5 л при давлении $1{,}5 \cdot 10^5$ Па. Определить температуру газа, если
при изотермическом расширении его давление уменьшилось в 1,6 раза. Какую работу совершил газ, если его масса 2,91 г?

30. Закись азота массой 15 г, взятой при температуре 220 К, расширяется при постоянном давлении. Во сколько раз изменится объем газа, если работа расширения газа равна

155,8 Дж. Определить количество теплоты, подведенное к системе.

Энтропия.

31. Температура водорода в изобарном процессе изменяется от 300 К до 500 К при подводе теплоты. Изменение энтропии при этом равно 742,9 Дж/К. Какова масса водорода?

32. Определить изменение энтропии 10г гелия, который изотермически расширяется от объема V_1 = 20 л до V_2 = 100 л.

33. Лед массой 1 кг, взятый при температуре (-10)°С, нагревают при атмосферном давлении так, что конечная температура воды составляет 40°С. Определить изменение энтропии системы в этом процессе.

34. Ртуть массой 20 г, взятая при начальной температуре 300°С, нагревается при постоянном давлении и полностью превращается в пар при температуре 550°С. Найти изменение энтропии при этом переходе.

35. При изохорном подведении теплоты к 4,2 г аргона его температура повысилась до 400К. Определить первоначальную температуру аргона, если энтропия в процессе изменилась 0,538 Дж/К.

36. Найти изменение энтропии при переходе 300 г расплавленного свинца, взятого при температуре плавления, в твердое состояние с конечной температурой 100^0С.

37. Определить изменение энтропии 24 г кислорода, который изотермически расширяется от объема V_1 =50 л до V_2 = 200 л.
38. Спирт массой 50 г, взятый при начальной температуре 0°С, нагревается при постоянном атмосферном давлении, и

полностью превращается в пар при температуре кипения. Найти изменение энтропии при этом переходе.

39. Температура неона в изобарном процессе изменяется от 250 К до 500 К при подводе теплоты. Изменение энтропии при этом равно 14,4 Дж/К. Какова масса неона?

40. Найти изменение энтропии при переходе 800 г расплавленного цинка, взятого при температуре плавления, в твердое состояние с конечной температурой 100^0 С.

Цикл Карно. КПД цикла Карно.

41. Определить работу A_2 изотермического сжатия газа, совершающего цикл Карно, к.п.д. которого η=0,4, если работа изотермического расширения равна A_1=8 Дж.

42. Газ, являясь рабочим веществом в цикле Карно, получил от нагревателя теплоту Q_1=4,38 кДж и совершил работу А=2,4 кДж. Определить температуру нагревателя, если температура охладителя T_2=273 К.

43. Газ, совершающий цикл Карно, 3/4 теплоты, полученной от нагревателя, отдает холодильнику. Температура холодильника 0^0С. Определить температуру нагревателя.

44. Газ совершает цикл Карно. Абсолютная температура нагревателя в 3 раза выше абсолютной температуры холодильника. Какую долю теплоты, получаемой за один цикл от нагревателя, газ отдает холодильнику?

45. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, имеет температуру нагревателя 227^0С, температуру холодильника 127^0С. Во сколько раз нужно увеличить

температуру нагревателя, чтобы КПД машины увеличился в 3 раза?

46. Температура нагревателя тепловой машины, работающей по циклу Карно, 427^0C, холодильника 227^0C, причем холодильник этой тепловой машины служит нагревателем другой тепловой машины. У какой из машин КПД больше и во сколько раз, если разность температур нагревателя и холодильника у обеих машин одинакова?

47. КПД паровой машины составляет 50% от КПД идеальной тепловой машины, которая работает по циклу Карно в том же интервале температур. Температура пара, поступающего из котла в паровую машину, 227^0C, температура в конденсаторе 77^0C. Определить мощность паровой машины, если она за 1 ч потребляет уголь массой 200 кг с теплотворной способностью 31 МДж/кг.

48. Вычислить КПД цикла Карно, совершаемого трехатомным газом, состоящим из жестких (объемных) молекул, если при адиабатическом расширении объем его увеличивается от 6 до 7 дм^3.

49. Двухатомный газ совершает цикл Карно. Определить КПД цикла, если известно, что на каждый моль этого газа при его адиабатическом сжатии затрачивается работа 2,0 кДж. Температура нагревателя 127^0C.

50. Наименьший объем газа, совершающего цикл Карно, 12 дм^3. Определить наибольший объем, если объем газа в конце изотермического расширения 60 дм^3, в конце изотермического сжатия - 19 дм^3.

Явления переноса. Диффузия. Вязкость. Теплоперенос.

51. Динамическая вязкость аргона при нормальных условиях η=22 мкПа·с. Вычислить длину свободного пробега λ

молекулы аргона и коэффициент диффузии D аргона при нормальных условиях.

52. Кислород и углекислый газ находятся при одинаковых температуре и давлении. Эффективные диаметры молекул этих газов соответственно равны 0,35 нм и 0,40 нм. Найти для этих газов отношения: а) коэффициентов диффузии D_1/D_2; б) коэффициентов внутреннего трения η_1/η_2.

53. Коэффициент диффузии кислорода при 0^0С равен 0,19 см^2/с. Определить длину свободного пробега молекул кислорода.

54. За сколько времени 720 мг углекислого газа продиффундирует из чернозема в атмосферу через 1 м^2 его поверхности при среднем градиенте плотности азота в направлении, перпендикулярном площади, равном $0{,}5\cdot10^{-6}$ г/см^4? Коэффициент диффузии принять равным 0,04 см^2/с.

55. Найти количество азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку 10 см^2 за время 5 с, если градиент плотности азота в направлении, перпендикулярном площади, равен $1{,}26\cdot10^{-3}$ г/см^4. Коэффициент диффузии 1,42 см^2/с.

56. За сутки через 1 м^2 поверхности дерева из подзолистой почвы продиффундировало 145 г углекислого газа. Определить коэффициент диффузии углекислого газа, если градиент плотности равен $1{,}4\cdot10^{-5}$ г/см^4.

57. Коэффициент диффузии водорода при нормальных условиях равен 0,91 см^2/с. Определить коэффициент теплопроводности водорода при этих условиях.

58. Эффективный диаметр молекулы аргона $2{,}7\cdot10^{-8}$ см. Определить коэффициент внутреннего трения для аргона при 50^0С.

59. При нормальных условиях коэффициент внутреннего трения азота равен $1{,}7\cdot10^{-5}$ $^{Па}\cdot$с. Найти среднюю длину свободного пробега молекул азота.

60. Сколько молекул содержится в 1 см^3 кислорода, находящегося при давлении $1{,}013\cdot10^5$ Па и температуре 27^0C? Чему равна средняя арифметическая скорость этих молекул? Сколько соударений в секунду испытывает молекула, если ее эффективный диаметр $2{,}9\cdot10^{-10}$ м?

Элементы статистической физики

Распределение Больцмана

61. Давление воздуха у поверхности Земли p=100 кПа. Считая температуру воздуха постоянной и равной T=270 K. Определить концентрацию молекул n воздуха: а) у поверхности Земли; б) на высоте h=8 км.

62. В кабине вертолета барометр показывает давление p_1=86 кПа. На какой высоте h летит вертолет, если у поверхности Земли давление равно p_2=0,10 МПа. Считать, что температура воздуха постоянна и равна 280 К.

63. На какой высоте h содержание водорода в воздухе по сравнению с содержанием углекислого газа увеличится вдвое? Среднюю по высоте температуру воздуха считать T=300 К.

64. Определить число молекул в единице объема n воздуха на высоте h=2 км над уровнем моря. Температуру считать постоянной и равной 10^o С. Давление на уровне моря p_o=101 кПа.

65. Определить высоту горы, если давление на ее вершине равно половине давления на уровне моря. Температуру считать всюду одинаковой и равной 0^o С.

66. На поверхности Земли барометр показывает 101 кПа. Каково будет показание барометра при подъеме его на

Останкинскую телевизионную башню, высота которой 540 м? Температуру считать одинаковой и равной 7^o С.

67.Подъеме вертолета на некоторую высоту барометр, находящийся в его кабине, изменил свое показание на 11 кПа. На какой высоте летит вертолет, если на взлетной площадке барометр показывал 0,1 МПа? Температуру воздуха считать всюду одинаковой и равной 17^o С.

68. В атмосфере находятся частицы пыли, имеющие массу $m = 8 \cdot 10^{-22}$ кг и объем $V = 5 \cdot 10^{-22}$ $м^3$. Найти уменьшение их концентрации на высоте 30 м при нормальных условиях.

69.На сколько различаются высоты двух уровней в поле Земли, если концентрация кислорода на верхнем уровне на 1% меньше, чем на нижнем. Температура кислорода $t = 27^0$С.

70. На какой высоте концентрация молекул кислорода и азота вдвое меньше их концентрации на уровне моря? Температура всюду одинакова и равна 300К.

Распределение Максвелла.

71. Какая часть молекул кислорода обладает скоростями, отличающимися от наивероятнейшей не больше чем на 10 м/с, при температурах 0 и 300^o С?

72. Написать выражение для среднего числа dN молекул газа, кинетические энергии которых заключены между ε и $\varepsilon+d\varepsilon$.

73. При каком значении температуры число молекул находящихся в пространстве скоростей в фиксированном интервале (v, v+dv), максимально?

74. Найти отношение числа молекул водорода n_1 скорости которых лежат в пределах от 3000 до 3010 м/с, к числу молекул n_2, имеющих скорости в пределах от 1500 до 1510 м/с, если температура водорода 300^o С.

75. Имеется N частиц, энергия которых может принимать лишь два значения E_1 и E_2. Частицы находятся в равновесном

состоянии при температуре T. Чему равна суммарная энергия E всех частиц в этом состоянии?

76. При какой температуре T воздуха средние скорости молекул азота (N_2) и кислорода (O_2) отличаются на 300 м/с?

77. Преобразовать функцию распределения Максвелла, перейдя от переменной v к переменной $u=v/v_{вер}$, где $v_{вер}$ - наиболее вероятная скорость молекул.

78. Вычислить наиболее вероятную, среднюю и среднеквадратичную скорости молекул кислорода (O_2) при 20^o C.

79. В сосуде объемом 30 л находится 100 г кислорода под давлением $3\cdot10^4$ Па. Определить наиболее вероятное значение кинетической энергии молекул кислорода.

80. На какой высоте концентрация молекул кислорода и азота вдвое меньше их концентрации на уровне моря? Температура всюду одинакова и равна 300К.

81. Во сколько раз число свободных электронов, приходящихся на один атом металла при T=0, больше в алюминии, чем в меди, если уровни Ферми соответственно равны ε_f =11,7 эВ, ε_f =7 эВ.

82. Металл находится при температуре T=0 К. Определить во сколько раз число электронов с кинетической энергией от $\varepsilon_f/2$ до ε_f больше числа электронов с энергией от 0 до $\varepsilon_f/2$.

83. Концентрация свободных электронов проводимости в металле $n=5\cdot10^{22}$см $^{-3}$. Найти среднее значение энергии свободных электронов при T=0 К.

84. Определить долю свободных электронов в металле при T = 0, энергия которых меньше 1/3 энергии Ферми.

85. Металл находится при абсолютном нуле. Определить относительное число электронов, энергия которых отличается от энергии Ферми на 1,5%.

86. Зная энергию Ферми электронов в золоте ε_f = 5,5эВ, определить долю электронов, которые при нагревании металла до Т = 1000 К выйдут за пределы уровня Ферми.

87. Вольфрам нагрели до температуры Т = 3600 К. Энергия Ферми для вольфрама ε_f = 9,2 эВ. Какая доля электронов окажется выше уровня Ферми (в процентах).

88. Энергия электронов на уровне Ферми в платине равна 6эВ. До какой температуры нагрели платину, если доля электронов вышедших за пределы уровня Ферми при этой температуре, составляет 1,1 %?

89. Определить энергию и импульс электрона на уровне Ферми в алюминии, плотность которого 2698,9 кг/м^3, считая, что на каждый атом приходится 3 свободных электрона.

90. Плотность урана равна 18950 кг/м^3. Зная, что на каждый атом урана приходится два свободных электрона, определить импульс и энергию электрона на уровне Ферми.

Распределение Бозе-Эйнштейна. Тепловые свойства твердых тел.

91. Вычислить энергию нулевых колебаний, приходящуюся на один грамм меди, дебаевская температура которой θ_D=300 К.

92. Определит максимальную частому ω_{max} собственных колебаний в кристалле золота, дебаевская температура которого θ_D=300 К.

93. Показать, что молярная теплоемкость кристалла при температуре $T \ll \theta_D$, где θ_D – дебаевская температура, определяется соотношением $C = \frac{12}{5}\pi^4 R\left(\frac{T}{\theta}\right)^3$.

94. Найти энергию E фонона, соответствующего максимальной частоте ω_{max} Дебая, если дебаевская температура θ_D=250 К.

95. При давлении p=1013 гПа аргона затвердевает при температуре, равной 84 К. Температура Дебая для аргона θ_D=92 К. Экспериментально установлено, что при T_1=4,0 К молярная теплоемкость аргона C_1=0,174 Дж/(моль·К). Определить значение молярной теплоемкости аргона C_2 при T_2=2,0 К.

96. Приняв для серебра значение температуры Дебая θ_D=208 К, определить

а) максимальное значение энергии ε_m фонона;

б) среднее число $\langle n_m \rangle$ фононов с энергией ε_m при температуре T=300 К.

97. Найти молярную энергию нулевых колебаний кристалла, для которого характеристическая температура Дебая θ_D=320 К.

98. Найти максимальную энергию ε_m фонона, который может возбуждаться в кристалле, характеризуемом температуре Дебая θ_D=300 К. Фонон какой длины волны λ обладал бы такой же энергией?

99. Характеристическая температура Дебая для хлорида калия θ_D=230 К, а для хлорида натрия θ_D=280 К. Во сколько раз удельная теплоемкость KCl больше удельной теплоемкости NaCl при температуре 40 К?

100. Определить энергию U_0 нулевых колебаний охлажденного до затвердения моля аргона (температура Дебая θ_D=92 К).

Таблица вариантов

№ вар	Номера задач									
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91
2	2	12	22	32	42	52	62	72	82	92
3	3	13	23	33	43	53	63	73	83	93
4	4	14	24	34	44	54	64	74	84	94
5	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
6	6	16	26	36	46	56	66	76	86	96
7	7	17	27	37	47	57	67	77	87	97
8	8	18	28	38	48	58	68	78	88	98
9	9	19	29	39	49	59	69	79	89	99

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Плотность веществ

Вещество	ρ, 10^3 кг/м^3	Вещество	ρ, 10^3 кг/м^3
Твердое тело		Жидкость	
Алмаз	3,5	Бензол	0,88
Алюминий	2,7	Вода	1,00

Вольфрам	19,1	Глицерин	1,26
Графит	1,6	Касторовое масло	0,90
Дерево	0,8	Керосин	0,80
Железо (сталь)	7,8	Ртуть	13,6
Золото	19,3	Спирт	0,79
Кобальт	8,9	Тяжелая вода	1,1
Кирпич	1,8	Эфир	0,72
Лед	0,9		
Олово	7,8	Газы	
Медь	8,9		
Никель	8,8	Азот	$1,25\cdot10^{-3}$
Платина	21,5	Аммиак	$0,77\cdot10^{-3}$
Пробка	0,2	Водород	$0,09\cdot10^{-3}$
Свинец	11,3	Воздух	$1,293\cdot10^{-3}$
Серебро	10,5	Гелий	
Титан	4,5	Кислород	$1,43\cdot10^{-3}$
Уран	19,0	Метан	$0,72\cdot10^{-3}$
Фарфор	2,3	Углекислый газ	$1,98\cdot10^{-3}$
Цинк	7,0	Хлор	$3,21\cdot10^{-3}$

2. Коэффициенты теплового расширения (при комнатной температуре)

Твердое тело	Коэффициент линейного расширения α, 10^{-6} K^{-1}	Жидкость	Коэффициент объемного расширения β,10^{-4} K^{-1}
Алюминий	22,9	Вода	2,1
Латунь	18,9	Глицерин	5,0
Медь	16,7	Керосин	10,0
Сталь (железо)	11	Ртуть	1,8
Стекло обычное	8,5	Спирт этиловый	11,0
Свинец	29,0	Серная кислота	5,6
Примечание: $\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{\partial l}{\partial T}, \beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial T}$			

3. Температура плавления и удельная теплота плавления некоторых веществ

Вещество	Температура плавления Т,К	Удельная теплота плавления q, кДж/кг
Алюминий	933	400,0
Вольфрам	3660	184,6
Железо	1803	277,0
Лед	273	335,0
Медь	1356	213,0
Олово	505	60,7
Свинец	600	25,0
Серебро	1233	105,0

4. Удельная теплота сгорания

Вещество	Удельная теплота сгорания q, 10^7 Дж/кг	Вещество	Удельная теплота сгорания q, 10^7 Дж/кг
Бензин Дерево Каменный уголь	4,61 1,26 2,39	Керосин Нефть Спирт	4,61 4,61 2,93

5. Постоянные некоторых жидкостей

Жидкость	Поверхностное натяжение α (при комнатной температуре), 10^{-2} Н/м	Вязкость η, мПа·с	Температура парообразования (кипения) Т,К	Удельная теплота парообразования (при температуре кипения) q, 10^5 Дж/кг
Вода	7,4	1,0	373	22,60
Глицерин	6,6	$8{,}5 \cdot 10^2$	-	-
Ртуть	47,1	1,6	630	2,82
Спирт	2,2		351	9,05

6. Удельная теплоемкость веществ

Вещество	c, кД/кг·К	Вещество	c, кД/кг·К
Твердое тело		Жидкость	
Алюминий	0,90	Бензин	2,09
Бронза	0,38	Вода	4,18
Вольфрам	0,13	Глицерин	2,42
Дерево (дуб)	2,40	Масло (трансформаторное)	2,09
Железо	0,46	Нефть	1,67-2,09
Золото	0,13	Ртуть	0,14
Латунь	0,38	Скипидар	1,76
Лед	2,09	Спирт	2,42
Медь	0,39	Эфир этиловый	2,34
Нихром	0,46	Газы	
Олово	0,20	Азот	1,04
Парафин	3,20	Водяной пар	2,13
Платина	0,13	Водород	14,27
Пробка	2,05	Воздух	1,01
Свинец	0,13	Гелий	5,20
Серебро	0,23	Двуокись углерода (CO_2)	0,88
Сталь	0,50	Кислород	0,91
Стекло	0,67-0,83	Метан	2,48
Углерод (графит)	0,46-0,71	Окись углерода	1,04
Фарфор	0,75		
Цинк	0,38		
Чугун	0,54		
Эбонит	1,38		

7. Характеристики некоторых газов

Газ	Относительная молекулярная масса	$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$	Теплопроводность ℵ, $\frac{мВт}{м \cdot К}$	Вязкость η, мкПа·с	Диаметр d, нм	Постоянные Ван-дер-Ваальса	
						a, $\frac{Па \cdot м^6}{моль^2}$	b,10^{-6} $\frac{м^3}{моль}$
He	4	1,67	141,5	18,9	0,20	-	-
Ar	40	1,67	16,2	22,1	0,35	0,132	32
H_2	2	1,41	168,4	8,4	0,27	0,024	27
N_2	28	1,40	24,3	16,7	0,37	0,137	39
O_2	32	1,40	24,4	19,2	0,35	0,137	32
CO_2	44	1,30	23,2	14,0	0,40	0,367	43
H_2O	18	1,32	15,8	9,0	0,30	0,554	30
Воздух	29	1б40	24б1	17б2	0б35	-	-
Примечание. Значение γ,ℵ и η - при нормальных условиях.							

8. Критические температура и давление

Газ	$t_к$, ^{0}C	$p_к$, МПа
Азот	-146	3,3
Водяной пар	374	22
Кислород	-119	5,0
Углекислый газ	31	7,4

9. Диэлектрическая проницаемость (относительная)

Диэлектрик	ε	Диэлектрик	ε
Вода	81	Слюда	7,5
воздух	1,00058	Спирт	26
Керосин	2,0	Стекло	6,0
Парафин	2,0	Фарфор	6,0
Плексиглас	3,5	Эбонит	2,7
Полиэтилен	2,3		

10. Магнитные восприимчивости пара- и диамагнетиков

Парамагнетики	χ, 10^{-6}	Диамагнетики	χ, 10^{-6}
Азот	0,013	Водород	-0,063
Алюминий	23	Бензол	-7,5
Воздух	0,38	Висмут	-176
Вольфрам	176	Вода	-9,0
Жидкий кислород	3400	Каменная соль	-12,6
		Кварц	-15,1
Кислород	1,9	Медь	-10,3
Марганец	121	Стекло	-12,3
Платина	360		
Эбонит	14		

11. Потенциал ионизации атомов

Z	Атом	Потенциал ионизации φ, В	Z	Атом	Потенциал ионизации φ, В
1	H	13,59	7	N	14,54
2	He	24,58	8	O	13,62
3	Li	5,39	9	F	17,42
4	Be	9,32	10	Ne	21,56
5	B	8,30	11	Na	5,14
6	C	11,27	12	Hg	10,44

12. Подвижность ионов (см^2/В·с)

Вещество	Положительные ионы	Отрицательные ионы
Азот	1,3	1,8
Водород	5,4	7,4
Воздух	1,4	1,9
Кислород	1,3	1,8
Оксид углерода	1,0	1,1
Хлор	0,6	0,5

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. - М., Наука, 1989.
2. Савельев И.В. Курс физики. Т.3. - М., Наука, 1989.
3. Трофимов Т.И. Курс физики. - М., Высшая школа, 1990.
4. Яворский Б.Я, Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1985.
5. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики. - М., Высшая школа, 1991.
6. Физика. Задания к практическим занятиям / Под ред. Ж.П. Лагутиной. – Минск: Высшая школа, 1988.
7. Сборник задач по курсу общей физики / Под ред. М.С. Цедрика. - М.: Просвещение, 1989.
8. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике. - М.: Наука, 1988.
9. Сена Л.А. Сборник вопросов и задач по физике. - М.: Высшая школа, 1986.
10. Сборник задач по курсу общей физики «Термодинамика и молекулярная физика». - М.: Наука, 1976.
11. Чертов А.Н., Воробьев А.А.. Задачник по физике. - М.: Высшая школа, 1988.
12. Бешков Б.С.. Решение задач по физике, общие методв.- М.: Высшая школа, 1988.
13. Фирганг Е.В.. Руководство к решению задач по курсу общей физики. - М.: Высшая школа, 1978.
14. Кузьмичев В.Е.. Законы и формулы физики. Справочник. - Киев, Наукова думка, 1989.
15. Волькенштейн В.С.. Сборник задач по общему курсу физики. - М.: Наука, 1973.

Шелкунова З.В., Санеев Э.Л.

Методические указания и контрольные задания для студентов заочного обучения

Термодинамика и статистическая физика

Подписано в печать 20.03.2010 г. Формат 60×80 1/16
Усл.п.л. 3,31. Тираж _50_ экз. Заказ № 182.

Издательство ВСГТУ.
670013. г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в.