

Федеральное агентство по образованию
Кубанский государственный технологический университет
Кафедра физики

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ОБЩЕМУ КУРСУ ФИЗИКИ

Для студентов очной и заочной форм обучения всех специальностей

РАЗДЕЛ 5. Статистическая физика и термодинамика

**РАЗДЕЛ 6. Элементы физики твердого тела
и физической электроники**

- Особенности письменного экзамена по физике
- Лекционная программа
- Основные законы и формулы
- Задачи письменного экзамена
- Рекомендуемая литература

Краснодар
2008

Составители: канд. физ.-мат. наук, доц. А.И. Гаврилов;
канд. техн.-мат. наук, доц. И.В. Двадненко;
аспир. Л.Е. Изотова;
канд. тех.-мат. наук, доц. Е.С. Киселева;
ст. преп. В.В. Кривченско;
канд. хим. наук, доц. А.В. Лаврентьев;
ассист. Т.А. Лактионова;
ст. преп. В.М. Лекарев;
д-р. техн. наук, доц. А.С. Магомадов;
ассист. Р.Г. Мальцев;
канд. тех.-мат. наук, доц. А.Ф. Маштаков;
канд. техн. наук, доц. В.Г. Миненко;
ст. преп. Ф.В. Москаленко;
ст. преп. П.А. Осюшкин;
ассист. Г.П. Падалкина;
канд. пед. наук. М.Л. Романова;
канд. тех. наук. Б.В. Ромашко;
канд. пед. наук, доц. Е.В. Рыкова;
ст. преп. Е.В. Сердюк;
ст. преп. М.И. Сомова;
ассист. Е.Ю. Стригин;
канд. пед. наук, доц. Р.В. Терюха;
канд. техн. наук, доц. А.А. Федоров;
ст. преп. В.Г. Чередниченко;
д-р. пед наук, проф. Т.Л. Шапошникова

УДК 53 076.5+536

Сборник задач по общему курсу физики. Раздел 5. Статистическая физика и термодинамика. Раздел 6. Элементы физики твердого тела и физической электроники / Сост.: А. И. Гаврилов, И. В. Двадненко, Л. Е. Изотова и др.; Кубан. гос. технол. ун-т. Каф. физики. – Краснодар: Изд. КубГТУ, 2008. – 64 с.

Составлено в соответствии с программой по физике для вузов. Предназначено для студентов всех форм обучения и всех специальностей.

Ил. 3. Библиогр.: 27 назв.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Кубанского государственного технологического университета

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф. И.М. Дунаев (КубГТУ);
канд. физ.-мат., доц. Л.Н. Караванская (КубГТУ)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Особенности письменного экзамена по физике	5
2. Лекционная программа	7
3. Основные законы и формулы	11
4. Задачи письменного экзамена	20
Раздел 5. Статистическая физика и термодинамика	
Глава 1. Молекулярно-тепловое движение и первое начало термодинамики	20
П.1.1 Законы и уравнение состояния идеального газа	20
П.1.2 Внутренняя энергия, работа и теплота в термодинамике. Теплоемкость вещества. Работа расширения газа	23
П.1.3 Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам. Адиабатный процесс.	27
Глава 2. Статистические распределения	32
П.2.1 Вероятность и флуктуации. Распределение Максвелла и его зависимость от температуры. Средние значения скоростей и наиболее вероятная скорость	32
П.2.2 Распределение числа частиц по высоте. Распределение Больцмана. Распределение Максвелл-Больцмана	35
Глава 3. Основы термодинамики	37
П.3.1 Цикл Карно. Максимальный КПД тепловой машины	37
П.3.2 Энтропия. Принцип возрастания энтропии	39
Глава 4. Фазовые равновесия и фазовые превращения. Конденсированное состояние	41
П.4.1 Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Критическое состояние. Эффект Джоуля-Томсона	41
Глава 5. Физическая кинетика. Явления переносов	43
П.5.1. Средняя длина свободного пробега	43
П.5.2. Коэффициенты диффузии, теплопроводности и вязкости и их структура для газов	45
Раздел 6. Элементы физики твердого тела и физической электроники	47
Глава 1. Элементы физики твердого тела	47

П. 1.1 Элементы кристаллографии	47
Глава 2. Элементы физической электроники в вакууме и газе	48
П. 2.1 Термоэлектронная эмиссия	48
П. 2.2 Электропроводность слабоионизированных газов	49
П. 2.3. Классическая теория теплоемкости. Теория теплоемкости Эйнштейна	50
П. 2.4. Теория теплоемкости Дебая	52
П. 2.5. Теплоемкость кристаллов при низких и высоких температурах	55
П. 2.6. Электропроводность металлов. Распределение Ферми-Дирака	57
5. Список литературы	61

1 Особенности письменного экзамена по физике

Письменный экзамен по физике для студентов первого курса проводится по экзаменационным билетам, составленным в соответствии с программой дисциплины «Физика» по направлениям 550 000 – «Технические науки» и 540 000 – «Профессиональное образование», утвержденной Главным управлением образовательно-профессиональных программ и технологий Государственного комитета РФ по народному образованию в 1996 г.

Экзаменационный билет состоит из пяти заданий: двух теоретических вопросов и трёх задач. Продолжительность экзамена по физике составляет 135 минут.

Правильное решение и полное оформление задачи должно содержать следующие основные элементы:

- краткое содержание задачи, записанное в стандартном виде: «Дано», «Найти», «Решение». В разделе «Дано» должны быть записаны все данные по условию задачи величины и постоянные, необходимые для решения. Если некоторые величины даются не в системе единиц СИ, то следует их перевести в эту систему;
- рисунок или чертёж со всеми необходимыми элементами и обозначениями при условии, что он нужен для решения данной задачи;
- вывод формул для искомых величин, т.е. само решение в общем виде (как правило). Исключения возможны только в том случае, если вывод формулы в общем виде очень громоздок, а промежуточные вычисления облегчают решение;
- пояснения к решению, т.е. ссылки на физические законы, расшифровки новых величин, вводимых по ходу решения задачи и не данных по условию, и текст, объясняющий логику решения;
- проверку правила размерностей в конечной формуле и в промежуточных, если производятся промежуточные вычисления;
- вычисление численного результата и запись ответа в рациональном виде.

Проверка экзаменационной работы проводится следующим образом:

- за каждый ответ выставляется определенное количество баллов;
- максимальное количество условных баллов за задание билета равно 5;
- снижение условных баллов производится преподавателем за те или иные ошибки, обнаруженные при проверке;
- при этом каждое снижение должно сопровождаться подчеркиванием красным и обязательным указанием количества снятых баллов и комментарием на полях экзаменационной работы замеченной ошибки. Не допускается снижения условных баллов без соответствующих пояснений;
- после этого преподаватель подсчитывает снятые и оставшиеся баллы и проставляет только оставшиеся баллы за каждое из шести заданий в двух местах: внизу справа от ответа и на полях рядом с текстом задания на первой странице бланка ответов;
- просуммировав оставшиеся условные баллы за все задания, преподаватель

подводит красную черту и проставляет суммарный условный балл за весь ответ на полях ниже текстов заданий на первой странице бланка ответа.

В зависимости от полученного суммарного условного балла за работу в целом выставляется оценка цифрой и словом в скобках. Рядом с выставленной оценкой преподаватель расписывается и в скобках обязательно расшифровывает свою подпись. При выставлении итоговой оценки преподаватели должны руководствоваться следующими критериями.

Оценка «5» (отлично) ставится за 25 – 21,5 условных баллов. Кроме того, оценка «5» является предварительной оценкой и не выставляется преподавателем, проверяющим работу самостоятельно. Работы, оцененные на «5», в обязательном порядке передаются на дополнительную проверку заведующему кафедрой, который проставляет в случае своего согласия оценку «5» и свою подпись рядом с подписью проверяющего преподавателя на экзаменационной работе.

Оценка «4» (хорошо) ставится за 16,5 - 21 условных баллов.

Оценка «3» (удовлетворительно) ставится за 8,5-16 условных баллов.

Оценка «2» (неудовлетворительно) ставится за 0 – 8 условных баллов.

Правила и критерии выставления условных баллов при проверке ответа на теоретический вопрос

Теоретический вопрос оценивается максимально 5 баллами.

При ответе на теоретический вопрос ошибки могут быть трех категорий: грубые ошибки, негрубые ошибки и недочеты. Примерами грубых ошибок являются: незнание основных понятий, законов формул, неумение ими пользоваться, непонимание физического смысла понятий и явлений. К негрубым ошибкам относятся ошибки, не искажающие сущность вопроса. Недочетами считаются неточности и небрежности в записи формул и определений, недостаточная наглядность в иллюстрациях и т.д.

Оценка за ответ в условных баллах выставляется в следующем порядке:

«5» - если студент глубоко и прочно усвоил весь программный материал, исчерпывающе, последовательно, грамотно и логически стройно его излагает, тесно увязывает теорию с практикой;

«4» - если студент твердо знает программный материал, грамотно и по существу излагает его, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, может правильно применять теоретические положения и владеет необходимыми навыками при выполнении практических заданий;

«3» - если студент усвоил только основной материал, но не знает отдельных деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушает последовательность в изложении программного материала и испытывает затруднения в выполнении практических заданий;

«2» - если студент не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, с большими затруднениями выполняет практические работы;

«0» - если ответ на теоретический вопрос по существу отсутствует.

2 ЛЕКЦИОННАЯ ПРОГРАММА

Раздел 5. Статистическая физика и термодинамика

Глава 1. Молекулярно-тепловое движение и первое начало термодинамики

- § 1.1. Основные представления и методы (статистический и термодинамический) в молекулярно-кинетической теории вещества
- § 1.2. Понятие об идеальном газе. Законы и уравнение состояния идеального газа
- § 1.3. Внутренняя энергия работа и теплота в термодинамике. Теплоемкость вещества. Работа расширения газа
- § 1.4. Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам
- § 1.5. Адиабатный процесс

Глава 2. Статистические распределения

- § 2.1. Вероятность и флуктуации. Распределение Максвелла и его зависимость от температуры. Средние значения скоростей и наиболее вероятная скорость
- § 2.2. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Средняя кинетическая энергия частицы и ее связь с давлением
- § 2.3. Распределение числа частиц по высоте. Распределение Больцмана. Распределение Максвелл-Больцмана
- § 2.4. Экспериментальные обоснования распределений Максвелла и Больцмана
- § 2.5. Распределение Гиббса и его связь с распределением Больцмана
- § 2.6. Квантовые статистики. Распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна
- § 2.7. Распределение кинетической энергии по степеням свободы. Классическая теория теплоемкостей многоатомных газов и ее недостаточность
- § 2.8. Квантовая теория теплоемкостей Эйнштейна

Глава 3. Основы термодинамики

- § 3.1. Обратимые и необратимые процессы
- § 3.2. Второе начало термодинамики
- § 3.3. Цикл Карно. Максимальный КПД тепловой машины
- § 3.4. Энтропия. Принцип возрастания энтропии

- § 3.5. Термодинамические потенциалы, физический смысл энтропии. Условия равновесия
- § 3.6. Определение энтропии равновесной и неравновесной системы через статистический вес состояния
- § 3.7. Элементы термодинамики необратимых процессов

Глава 4. Фазовые равновесия и фазовые превращения. Конденсированное состояние

- § 4.1. Фазы и компоненты. Условие равновесия фаз. Фазовые переходы первого и второго рода
- § 4.2. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Критическое состояние. Эффект Джоуля-Томсона
- § 4.3. Изотермы Эндрюса и Ван-дер-Ваальса. Метастабильные состояния. Физический смысл критического состояния
- § 4.4. Уравнение Клапейрона - Клаузиуса. Фазовые диаграммы. Тройная точка
- § 4.5. Строение и свойства жидкостей. Ближний порядок

Глава 5. Физическая кинетика. Явления переносов

- § 5.1. Понятие о физической кинетике. Время релаксации. Эффективное сечение рассеяния. Средняя длина свободного пробега
- § 5.2. Общий механизм явлений переносов. Диффузия и теплопроводность в газах, жидкостях и твёрдых телах. Интегральные уравнения диффузии, теплопроводности и вязкости
- § 5.3. Коэффициенты диффузии, теплопроводности и вязкости и их структура для газов
- § 5.4. Дифференциальные уравнения диффузии и теплопроводности. Понятие о краевых задачах и методах их решения
- § 5.5. Вязкость. Коэффициент вязкости газов и жидкостей. Динамическая и кинематическая вязкости

Раздел 6. Элементы физики твёрдого тела и физической электроники

Глава 1. Элементы физики твёрдого тела

- § 1.1. Строение кристаллов. Точечные дефекты в кристаллах: вакансии. Примеси внедрения, примеси замещения
- § 1.2. Краевые и винтовые дислокации. Вектор Бюргерса. Дислокация и пластичность

- § 1.3. Понятие о фононах. Теплоёмкость кристаллов при низких и высоких температурах
- § 1.4. Решёточная теплопроводность. Размерный эффект в теплопроводности кристаллов
- § 1.5. Эффект Мёссбауэра и его применение

Глава 2. Элементы физической электроники в вакууме и газе

- § 2.1. Электрический ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия
- § 2.2. Электрический ток в газе. Процессы ионизации и рекомбинации. Электропроводность слабоионизированных газов
- § 2.3. Понятие о плазме. Плазменная частота. Дебаевская длина волны. Электропроводность плазмы

Глава 3. Элементы физической электроники в твердых телах

- § 3.1. Недостаточность классической электронной теории электропроводности металлов
- § 3.2. Квантовая теория свободных электронов в металле. Уровень Ферми, поверхность Ферми. Число электронных состояний в зоне. Электронный ферми-газ в металле. Электронная теплоёмкость
- § 3.3. Энергетические зоны в кристаллах. Теорема Блоха. Зонная структура энергетического спектра электронов
- § 3.4. Элементы квантовой теории электропроводности металлов. Носители тока как квазичастицы
- § 3.5. Элементы зонной теории кристаллов. Заполнение зон: металлы, диэлектрики, полупроводники
- § 3.6. Полупроводники. Понятие дырочной проводимости. Собственные и примесные полупроводники
- § 3.7. Полупроводниковые диоды и триоды
- § 3.8. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Термоэлектрические явления

Глава 4. Вещество в необычных состояниях

- § 4.1. Теория ферромагнетизма и антиферромагнетизма. Обменное происхождение молекулярного поля. Доменная структура. Техническая кривая намагничивания
- § 4.2. Сегнетоэлектрики их свойства и теория
- § 4.3. Жидкие кристаллы. Типы жидких кристаллов: нематики, холестерики, смектики. Примеры жидких кристаллов

- § 4.4. Поведение жидких кристаллов в электрическом и магнитном полях. Применение для измерения температуры, изготовления дифракционных решёток и дисплеев

Глава 5. Вещество в экстремальных условиях

- § 5.1. Явление сверхпроводимости. Куперовское спаривание как необходимое условие сверхпроводимости. Высокотемпературная сверхпроводимость
- § 5.2. Вещество при сверхвысоких температурах и сверхвысоких плотностях. Металлический водород
- § 5.3. Уравнение состояния вещества при больших плотностях. Карликовые белые звёзды
- § 5.4. Нейтронное состояние вещества. Пульсары
- § 5.5. Вещество в сверхсильных электромагнитных полях

Глава 6. Современная физическая картина мира

- § 6.1. Вещество и поле. Виды взаимодействий. Элементарные частицы и их классификация
- § 6.2. Частицы и античастицы
- § 6.3. Взаимопревращения частиц, слабое взаимодействие. Нейтрино
- § 6.4. Систематика элементарных частиц. Кварки
- § 6.5. Сильное, электромагнитное, и гравитационное взаимодействия
Иерархия взаимодействий
- § 6.6. О единых теориях материи. Физическая картина мира как философская категория

3 ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Термодинамика и молекулярная физика

- Основное уравнение кинетической теории идеального газа:

$$p = nkT = \frac{2}{3} n \frac{m \langle v \rangle^2}{2}.$$

- Средняя энергия хаотического теплового движения молекул идеального газа:

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

где i – сумма поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы.

- Закон Дальтона для давления смеси газов:

$$p = \sum_{i=1}^n p_i.$$

- Наиболее вероятная, средняя и средняя квадратичная скорости молекул идеального газа:

$$v_{вер} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{kT}{m}}, \quad v_{кв} = \sqrt{3 \frac{kT}{m}}.$$

- Уравнение состояния идеального газа:

$$PV = \frac{m}{M} RT,$$

где M – молярная масса (масса моля).

- Первое начало термодинамики:

$$Q = \Delta U + A,$$

где ΔU – приращение внутренней энергии системы.

- Внутренняя энергия идеального газа:

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT.$$

- Работа, совершаемая газом:

$$A = \int p \, dV.$$

- Работа, совершаемая газом при изотермическом изменении объема газа:

$$A_T = RT \frac{m}{M} \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

- Давление газа и его объем связаны при адиабатическом процессе уравнением Пуассона:

$$pV^\gamma = const,$$

где γ – показатель адиабаты $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

- Теплоемкость тела определяется как

$$C = \frac{dQ}{dT} \text{ Дж/К,}$$

где Q – количества тепла, сообщенное телу и повышающее его температуру на 1 К.

- Молярная теплоемкость, т.е. теплоемкость одного моля вещества:

$$C_v = \frac{1}{\nu} \frac{dQ}{dT}.$$

- Удельная теплоемкость

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}.$$

- Теплоемкость при постоянном объеме

$$C_v = \left(\frac{dU}{dT} \right)_v,$$

где U – внутренняя энергия тела.

- Теплоемкость при постоянном давлении

$$C_p = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p.$$

- Молярная теплоемкость газа при политропическом процессе ($pV^n = \text{const}$):

$$C = \frac{R}{\gamma - 1} - \frac{R}{n - 1} = \frac{(n - \gamma)R}{(n - 1)(\gamma - 1)}.$$

- Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{m}{M} C_v T = \frac{m}{M} \frac{RT}{\gamma - 1} = \frac{PV}{\gamma - 1}.$$

- Уравнение состояния ван-дер-ваальсовского газа (для моля):

$$\left(p + \frac{a}{V_M^2} \right) (V_M - b) = RT,$$

где V_M – молярный объем, занимаемый при данных p и T .

- Внутренняя энергия одного моля ван-дер-ваальсовского газа

$$U = C_v T - \frac{a}{V_M}.$$

- Барометрическая формула:

$$p = p_0 e^{-Mgh/RT},$$

где p_0 – давление на высоте $h=0$.

- Распределение Максвелла молекул по скоростям:

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT}.$$

- Распределение Максвелла молекул по проекции скорости:

$$\varphi(v_x) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} e^{-mv_x^2/2kT},$$

- Распределение Максвелла по модулю скорости:

$$F(v) = f \cdot 4\pi v^2$$

- Распределение Больцмана:

$$n = n_0 e^{-W_p / kT},$$

где n – концентрация молекул, обладающих потенциальной энергией W_p ,
 n_0 – концентрация молекул, с нулевой потенциальной энергией.

- КПД тепловой машины

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 – тепло, получаемое рабочим телом, Q_2 – отдаваемое тепло.

- КПД цикла Карно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 и T_2 – температуры нагревателя и холодильника.

- Неравенство Клаузиуса:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0,$$

где δQ – элементарное тепло, полученное системой (δQ – величина алгебраическая).

- Приращение энтропии системы:

$$\Delta S \geq \int \frac{\delta Q}{T}.$$

- Основное соотношение термодинамики:

$$TdS \geq dU + pdV.$$

- Связь между энтропией и статистическим весом Ω (термодинамической вероятностью):

$$S = k \ln \Omega,$$

где k – постоянная Больцмана.

- Соотношения между постоянными Ван-дер-Ваальса и параметрами критического состояния вещества:

$$V_{Mкр} = 3b, \quad p_{кр} = \frac{a}{27b^2}, \quad T_{кр} = \frac{8a}{27Rb}.$$

- Связь между критическими параметрами моля вещества:

$$p_{кр} V_{Mкр} = \frac{3}{8} RT_{кр}.$$

- Уравнение Клапейрона – Клаузиуса:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{q_{12}}{T(V_2' - V_1')},$$

где q_{12} – удельная теплота, поглощаемая при переходе $1 \rightarrow 2$, V_1' и V_2' – удельные объемы фазы 1 и 2.

- Относительное число молекул газа, пролетающих путь s без столкновений:

$$N/N_0 = e^{-s/\lambda},$$

где λ – средняя длина свободного пробега.

- Средняя длина свободного пробега молекулы газа

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v_{ap} \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 n}},$$

где $\langle v_{ap} \rangle$ – средняя арифметическая скорость, $\langle z \rangle$ – среднее число столкновений каждой молекулы с остальными в единицу времени, σ – эффективный диаметр молекулы, n – концентрация молекул.

- Общее число столкновений всех молекул в единице объема за единицу времени

$$Z = \frac{\langle z \rangle n}{2}.$$

- Масса, перенесенная за время Δt при диффузии,

$$m = -D \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \Delta S \Delta t,$$

где $\frac{\Delta \rho}{\Delta x}$ – относительное изменение плотности в направлении x , перпендикулярном к площадке ΔS .

- Импульс, перенесенный газом за время Δt , определяет силу внутреннего трения $F_{тр}$ в газе:

$$F_{тр} = -\eta \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta S,$$

где $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ – относительное изменение скорости течения газа в направлении x , перпендикулярном к площадке ΔS .

- Количество теплоты, перенесенное за время Δt вследствие теплопроводности, определяется формулой:

$$Q = -K \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta t,$$

где $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ – относительное изменение температуры газа в направлении x , перпендикулярном к площадке ΔS .

- Коэффициент диффузии D , вязкости η и теплопроводности газов:

$$D = \frac{1}{3} \langle v_{ap} \rangle \lambda, \quad \eta = \frac{1}{3} \langle v_{ap} \rangle \lambda \rho, \quad \kappa = \frac{1}{3} \langle v_{ap} \rangle \lambda \rho c_v,$$

где ρ – плотность газа, c_v – его удельная теплоемкость при постоянном объеме.

- Сила трения, действующая на единицу поверхности пластин при их движении параллельно друг другу в ультраразреженном газе:

$$F = \frac{1}{6} \langle v \rangle \rho |u_1 - u_2|,$$

где u_1 и u_2 – скорости пластин.

- Плотность потока тепла, переносимого ультраразреженным газом между двумя стенками:

$$q = \frac{1}{6} \langle v \rangle \rho c_v |T_1 - T_2|,$$

где T_1 и T_2 – температуры стенок.

Твердые тела

- Изменение температуры плавления dT при изменении давления на dp дается уравнением Клаузиуса-Клапейрона:

$$dT = T \cdot \frac{V_{0ж} - V_{0т}}{q_0} dp,$$

где q_0 – молярная теплота плавления, $V_{0ж}$ – молярный объем жидкости, $V_{0т}$ – молярный объем твердого тела, T – термодинамическая температура плавления.

- При не очень низких температурах для твердых тел имеет место закон Дюлонга и Пти, согласно которому молярная теплоемкость всех химически простых твердых тел равна приблизительно $3R = 25$ Дж/(моль·К).

- Количество теплоты Q , переносимое вследствие теплопроводности за время $\Delta\tau$, определяется формулой

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta \tau,$$

где $\Delta T/\Delta x$ – изменение температуры в направлении x , перпендикулярном к площадке ΔS , λ – теплопроводность.

- При повышении температуры длина твердых тел возрастает в первом приближении линейно с температурой:

$$l = l_0 (1 + \alpha t),$$

где l – длина тела при температуре t , l_0 – его длина при температуре $t_0=0^\circ\text{C}$, α – температурный коэффициент линейного расширения. Для твердых изотропных тел $\alpha=b/3$, где b – температурный коэффициент объемного расширения.

Элементы кристаллографии

- Объем V_0 одного килограмм-моля кристалла:

$$V_0 = \frac{\mu}{\rho},$$

где μ – киломоль, ρ – плотность кристалла.

- Объем V элементарной ячейки кристалла:

а) при кубической сингонии:

$$V = a^3;$$

б) при гексагональной сингонии:

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 \cdot c,$$

где a и c – параметры ячейки.

- Число Z_0 элементарных ячеек в одном килограмм-моле кристалла

$$Z_0 = \frac{V_0}{V}$$

или

$$Z_0 = \frac{kN_A}{n}.$$

где k – число одинаковых атомов в химической формуле соединения, N_A – число Авогадро, n – число одинаковых атомов, приходящихся на элементарную ячейку.

- Число Z_0 элементарных ячеек в единице объема кристалла

$$Z_0 = \frac{Z}{V_0},$$

а) в общем случае:

$$Z = \rho \frac{k N_A}{n \cdot A};$$

б) для кристалла, состоящего из одинаковых атомов ($k=1$):

$$Z = \rho \frac{N_A}{n \cdot A},$$

где A – килограмм-атом.

- Параметр кубической решетки

$$a = \sqrt[3]{\frac{n\mu}{k\rho N_A}}.$$

- Расстояние d между соседними атомами в кубической решетке:

а) в гранецентрированной:

$$d = \frac{a}{\sqrt{2}};$$

б) в объемно центрированной:

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} a.$$

Тепловые свойства твердых тел

- Энергия одного моля химически простых (состоящих из одинаковых атомов) твердых тел в классической теории теплоемкости выражается формулой

$$E=3RT,$$

где R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

- Теплоемкость одного моля химически простых твердых тел определяется по закону Дюлонга и Пти:

$$C_{\mu} = 3R.$$

- Для химически сложных тел (состоящих из различных атомов) теплоемкость одного моля определяется по закону Неймана-Коппа:

$$C_{\mu} = n \cdot 3R,$$

где n – общее число частиц в химической формуле соединения.

- Среднее значение $\langle \varepsilon \rangle$ энергии квантового осциллятора, приходящееся на одну степень свободы, в квантовой теории Эйнштейна выражается формулой

$$\langle \varepsilon \rangle = \varepsilon_0 + \frac{h\nu}{e^{kT} - 1},$$

где ε_0 – нулевая энергия ($\varepsilon_0 = 0,5h\nu$), h – постоянная Планка, ν – частота колебаний осциллятора, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

- Энергия одного моля кристалла в квантовой теории теплоемкости определяется как

$$E = E_0 + 3R \frac{\Theta_E}{e^{\frac{\Theta_E}{kT}} - 1},$$

где $E_0 = \frac{3}{2}R\Theta_E$ – нулевая энергия килограмм-атома, $\Theta_E = \frac{h\nu}{k}$ – характеристическая температура.

- Теплоемкость одного моля кристалла в квантовом состоянии

$$C_{\mu} = 3R \left(\frac{\Theta_E}{T} \right)^2 \frac{e^{\Theta_E/T}}{(e^{\Theta_E/T} - 1)^2}.$$

- Частотный спектр колебаний в теории Дебая задается функцией распределения частот $g(\nu)$. Число dZ собственных частот твердого тела, приходящихся на интервал частот от ν до $\nu + d\nu$:

$$dZ = g(\nu)d\nu.$$

- Для трехмерного кристалла, содержащего N атомов:

$$dZ = \frac{9N}{\nu_{\max}^3} \nu^2 d\nu,$$

ν_{\max} – максимальная частота, ограничивающая спектр колебаний.

- Энергия твердого тела:

$$E = \int_0^{\nu_{\max}} \langle \varepsilon \rangle g(\nu) d\nu.$$

- Энергия одного моля кристалла по Дебаю

$$E = E_0 + 3RT \cdot 3 \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{\Theta_D/T} \frac{x^3}{e^x - 1} dx,$$

где $E_0 = \frac{9}{8}R\Theta_D$ – нулевая энергия одного моля кристалла по Дебаю,

$\Theta_D = \frac{h\nu_{\max}}{k}$ – характеристическая температура Дебая.

- Теплоемкость одного моля кристалла по Дебаю:

$$C_{\mu} = 3R \left[12 \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \cdot \int_0^{\frac{\Theta_D}{T}} \frac{x^3}{e^x - 1} dx - \frac{3(\Theta_D/T)}{e^{\Theta_D/T} - 1} \right].$$

- Энергия фонона связана с частотой ν колебаний:

$$\varepsilon = h\nu.$$

- Квазиимпульс фонона

$$p = h/\lambda = \hbar k,$$

где λ – длина волны, $\hbar = h/2\pi$, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

- Скорость фонона (групповая):

$$u = \frac{d\varepsilon}{dp} = \frac{d\nu}{dk}.$$

- Фазовая скорость фонона:

$$u_{\phi} = \frac{\nu}{k}.$$

- Скорости волн в кристалле:

$$\text{продольных} - v_{\ell} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad \text{поперечных} - v_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

где E – модуль продольной упругости, G – модуль поперечной упругости, ρ – плотность твердого тела.

- Усредненное значение скорости звука определяется формулой:

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

• Теплота перенесенная через поверхность площадью S , перпендикулярную направлению теплового потока за время dt , определяется законом Фурье:

$$dQ = -\kappa \frac{dT}{dx} S dt$$

κ – коэффициент теплопроводности, dT/dx – проекция градиента температуры.

• Коэффициент теплопроводности κ связан с удельной теплоемкостью (на единицу объема) \tilde{c} , скоростью звука v и средней длиной свободного пробега фононов λ :

$$\kappa = \frac{1}{3} \tilde{c} \lambda v.$$

- Линейный коэффициент теплового расширения по определению

$$\alpha = \frac{1}{\ell} \frac{d\ell}{dT}.$$

- Плотность тока насыщения при термоэлектронной эмиссии с катода дается формулой Ричардсона – Дэшмана:

$$j_n = BT^2 e^{A/kT},$$

где $B=120(1-R) \text{ A}/(\text{см}^2\text{K}^2)$, R – коэффициент отражения электронов проводимости от потенциального барьера на поверхности эмиттера, A – работа выхода электронов с поверхности катода.

Полупроводники

- Удельная проводимость σ собственных проводников:

$$\sigma = n \cdot e(u_n + u_p),$$

где e – заряд электрона, n – концентрация носителей тока, u_n и u_p – подвижность электронов и дырок.

- Напряжение U_x на гранях образца при эффекте Холла:

$$U_x = R_x B b j,$$

где R_x – постоянная Холла, B – индукция магнитного поля, b – ширина пластины, j – плотность тока.

- Постоянная Холла для полупроводников типа алмаз, кремний, германий и других, обладающих носителями тока одного вида

$$R_x = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{n \cdot e}.$$

4 ЗАДАЧИ ПИСЬМЕННОГО ЭКЗАМЕНА

РАЗДЕЛ 5. Статистическая физика и термодинамика

ГЛАВА 1. Молекулярно-тепловое движение и первое начало термодинамики

П.1.1 Законы и уравнение состояния идеального газа

5.1. Найти массу атома: 1) водорода, 2) гелия.

Ответ: 1) $m_0=1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, 2) $m_0=6,65 \cdot 10^{-27}$ кг.

5.2. Какое число молекул содержит единица массы водяного пара?

Ответ: $N=3,3 \cdot 10^{25}$.

5.3. В сосуде вместимостью $V=4$ л находится $m=1$ г водорода. Какое число молекул газа n содержится в единице объема этого сосуда?

Ответ: $n=7,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

5.4. Какое количество молекул находится в комнате объемом $V=80 \text{ м}^3$ при температуре $t=17^\circ \text{ С}$ и давлении $p=100 \text{ кПа}$?

Ответ: $N=2 \cdot 10^{27}$.

5.5. Найти среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ молекул воздуха при температуре $t=17^\circ \text{ С}$. Молярная масса воздуха $\mu=0,029 \text{ кг/моль}$.

Ответ: $\langle v_{\text{кв}} \rangle=500 \text{ м/с}$.

5.6. Найти отношение средних квадратичных скоростей молекул гелия и азота при одинаковых температурах.

Ответ: 2,65.

5.7. Вычислить при температуре $t=17^\circ \text{ С}$:

а) среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ и среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_{\text{кв}} \rangle$ поступательно движущейся молекулы O_2

б) среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ капли воды диаметра $d=0,1 \text{ мкм}$, взвешенной в воздухе.

Ответ: а) $\langle v_{\text{кв}} \rangle=475 \text{ м/с}$, $\langle \varepsilon_{\text{кв}} \rangle=6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$; б) $\langle v_{\text{кв}} \rangle=0,015 \text{ м/с}$.

5.8. Найти число молекул n водорода в единице объема при давлении $p = 266,6$ Па, если средняя квадратичная скорость $\langle v_{кв} \rangle$ его молекул $2,4$ км/с.

Ответ: $n=4,2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

5.9. Плотность некоторого газа $\rho = 0,06$ кг/м³, средняя квадратичная скорость его молекул $\langle v_{кв} \rangle = 500$ м/с. Найти давление p , которое газ оказывает на стенки сосуда.

Ответ: $p=5$ кПа.

5.10. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа $\langle v_{кв} \rangle = 450$ м/с. Давление газа $p = 50$ кПа. Найти плотность газа ρ при этих условиях.

Ответ: $\rho = 0,74$ кг/м³.

5.11. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа при нормальных условиях $\langle v_{кв} \rangle = 461$ м/с. Какое число n молекул содержит единица массы этого газа?

Ответ: $n=2 \cdot 10^{25} \text{ кг}^{-1}$.

5.12. Какую температуру имеют $m = 2$ г азота, занимающего объем $V = 820$ см³ при давлении $p = 2 \cdot 10^5$ Па?

Ответ: $T=280$ К.

5.13. Найти плотность водорода ρ при температуре $t = 15$ °С и давлении $p = 730$ мм.рт.ст.

Ответ: $\rho = 0,081$ кг/м³.

5.14. Некоторый газ при температуре $t= 10$ °С и давлении $p=200$ кПа имеет плотность $\rho=0,34$ кг/м³. Найти молярную массу газа μ .

Ответ: $\mu = 0,004$ кг/моль.

5.15. Сосуд откачан до давления $p=1,33 \cdot 10^{-9}$ Па, температура воздуха $t = 15$ °С. Найти плотность воздуха ρ в сосуде.

Ответ: $\rho = 1,6 \cdot 10^{-14}$ кг/м³.

5.16. В баллоне находилось $m = 10$ кг газа при давлении $p = 10^7$ н/м². Найти, какую массу газа Δm взяли из баллона, если окончательное давление стало равно $p = 2,5 \cdot 10^6$ н/м². Температуру газа считать постоянной.

Ответ: $\Delta m = 7,5$ кг.

5.17. Во сколько раз плотность воздуха ρ_1 , заполняющего помещение зимой ($t_1 = 7^\circ\text{C}$), больше его плотности ρ_2 летом ($t_2 = 37^\circ\text{C}$)? Давление газа считать постоянным.

Ответ: $\rho_1/\rho_2 = 1,1$.

5.18. В сосуде находится смесь $m_1 = 7,0$ г азота и $m_2 = 11$ г углекислого газа при температуре $T = 290$ К и давлении $p_0 = 1,0$ атм. Найти плотность ρ этой смеси, считая газы идеальными.

Ответ: $\rho = 1,5$ кг/м³.

5.19. Сосуд объемом $V=20$ л содержит смесь водорода и гелия при температуре $t= 20^\circ\text{C}$ и давлении $p = 2 \cdot 10^5$ Па, масса смеси $m=5$ г. Найти отношение массы водорода к массе гелия.

Ответ: $m_{\text{H}_2}/m_{\text{He}} = 0,5$ кг.

5.20. Два теплоизолированных баллона 1 и 2 наполнены воздухом и соединены короткой трубкой с краном. Известны объемы баллонов, а также давление и температура воздуха в них (V_1, p_1, T_1 и V_2, p_2, T_2). Найти температуру T и давление p воздуха, которые установятся после открытия крана.

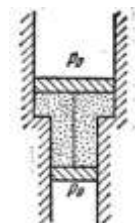
Ответ: $T = \frac{T_1 T_2 (p_1 V_1 + p_2 V_2)}{p_1 V_1 T_2 + p_2 V_2 T_1}$, $p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}$.

5.21. Найти давление воздуха в откачиваемом сосуде как функцию от времени откачки t . Объем V , давление P . Процесс считать изотермическим и скорость откачки, не зависящей от давления и равной C .

Примечание: Скоростью откачки называется объем газа, откачиваемого за единицу времени, причем этот объем изменяется при давлении газа в данный момент.

Ответ: $P = P_0 e^{-\frac{ct}{V}}$.

5.22. В гладкой открытой с обоих концов вертикальной трубе, имеющей два разных сечения, находятся два поршня, соединенные нерастяжимой нитью, а между поршнями – 1 моль идеального газа. Площадь сечения верхнего поршня на $\Delta S = 10$ см² больше, чем нижнего. Общая масса поршней $m = 5$ кг. Давление наружного воздуха $p = 1 \cdot 10^5$ Па. На сколько кельвин надо нагреть газ между поршнями, чтобы они переместились на $l = 5$ см?



Ответ: $\Delta T = 0,9$ К.

5.23. Что тяжелее: тонна свинца или тонна пробки? На сколько истинный вес пробки, которая в воздухе весит $P_{п} = 9,8$ кН, больше истинного веса свинца, который в воздухе весит также $P_{св} = 9,8$ кН? Температура воздуха $t = 17$ °С, давление $p = 100$ кПа.

Ответ: пробка на $\Delta P = 58,6$ Н.

5.24. Каков должен быть вес оболочки P детского воздушного шарика диаметром $D = 25$ см, наполненного водородом, чтобы результирующая подъемная сила шарика была равна нулю, т.е. чтобы шарик находился во взвешенном состоянии? Воздух и водород находятся при нормальных условиях. Давление внутри шарика равно внешнему давлению.

Ответ: $P = 96$ мН.

П.1.2 Внутренняя энергия, работа и теплота в термодинамике. Теплоемкость вещества. Работа расширения газа

5.25. Найти внутреннюю энергию W массы $m = 20$ г кислорода при температуре $t = 10$ °С. Какая часть этой энергии приходится на долю поступательного движения молекул и какая часть на долю вращательного движения?

Ответ: $W_{\text{пост}} = 2,2$ кДж, $W_{\text{вр}} = 1,5$ кДж.

5.26. Найти внутреннюю энергию W двухатомного газа, находящегося в сосуде объемом $V = 2$ л под давлением $p = 150$ кПа.

Ответ: $W = 750$ Дж.

5.27. Масса $m = 1$ кг двухатомного газа находится под давлением $p = 80$ кПа и имеет плотность $\rho = 4$ кг/м³. Найти энергию теплового движения W молекул газа при этих условиях.

Ответ: $W = 50$ кДж.

5.28. Какое число молекул N двухатомного газа содержит объем $V = 10$ см³ при давлении $p = 5,3$ кПа и температуре $t = 27$ °С? Какой энергией теплового движения обладают эти молекулы?

Ответ: $N = 1,3 \cdot 10^{19}$, $W = 0,133$ Дж.

5.29. Найти удельную теплоемкость c кислорода для: 1) $V = \text{const}$, 2) $p = \text{const}$.

Ответ: $c_V = 650$ Дж/(кг·К), $c_P = 910$ Дж/(кг·К).

5.30. Найти отношение удельных теплоемкостей c_P/c_V для кислорода.

Ответ: $c_P/c_V = 1,4$.

5.31. Удельная теплоемкость некоторого двухатомного газа $c_p=14,7$ кДж/(кг·К). Найти молекулярную массу μ этого газа.

Ответ: $\mu=0,002$ кг/моль.

5.32. Плотность некоторого двухатомного газа при нормальных условиях $\rho=1,43$ кг/м³. Найти удельные теплоемкости c_p и c_v этого газа.

Ответ: $c_v=650$ Дж/(кг·К), $c_p=910$ Дж/(кг·К).

5.33. Найти удельную теплоемкость c_p газовой смеси, состоящей из количества $\nu_1=3$ кмоль аргона и количества $\nu_2=3$ кмоль азота.

Ответ: $c_p=685,72$ Дж/(кг·К).

5.34. Найти отношение удельных теплоемкостей c_p/c_v для газовой смеси, состоящей из массы $m_1=8$ г гелия и массы $m_2=16$ г кислорода.

Ответ: $c_p/c_v=1,59$.

5.35. Удельная теплоемкость газовой смеси, состоящей из количества $\nu_1=1$ кмоль кислорода и некоторой массы m_2 аргона, равна $c_v=430$ кДж/(кг·К). Какая масса m_2 аргона находится в газовой смеси?

Ответ: $m_2=60$ кг.

5.36. Масса $m=10$ г кислорода находится при давлении $p=0,3$ МПа и температуре $t=10$ °С. После нагревания при $p=\text{const}$ газ занял объем $V_2=10$ л. Найти количество теплоты Q , полученное газом, и энергию теплового движения молекул газа W до и после нагревания.

Ответ: $Q=7,9$ кДж, $W=1,8$ кДж.

5.37. Масса $m=12$ г азота находится в закрытом сосуде объемом $V=2$ л при температуре $t=10$ °С. После нагревания давление в сосуде стало равным $p=1,33$ МПа. Какое количество Q теплоты сообщено газу при нагревании?

Ответ: $Q=4,15$ кДж.

5.38. В сосуде объемом $V=2$ л находится азот при давлении $p=0,1$ МПа. Какое количество Q теплоты надо сообщить азоту, чтобы: 1) при $p=\text{const}$ объем увеличился вдвое, 2) $V=\text{const}$ давление увеличилось вдвое?

Ответ: 1) $Q=700$ кДж, 2) $Q=500$ кДж.

5.39. В закрытом сосуде находится масса $m=14$ г азота при давлении $p=0,1$ МПа и температуре $t=27$ °С. После нагревания давление в сосуде повысилось в 5 раз. До какой температуры t_2 был нагрет газ? Найти объем V сосуда и количество теплоты Q , сообщенное газу.

Ответ: $T=1500$ К, $V=12,4$ л, $Q=12,4$ Дж.

5.40. Какое количество теплоты Q надо сообщить $m=12$ г массе кислорода, чтобы нагреть его на $\Delta t = 50$ °С при $p=\text{const}$?

Ответ: $Q = 545$ Дж.

5.41. На нагревание $m=40$ г массы кислорода от температуры $t_1 = 16$ °С до температуры $t_2 = 40$ °С затрачено количество теплоты $Q=628$ Дж. При каких условиях нагревался газ (при постоянном объеме или при постоянном давлении)?

Ответ: $V=\text{const}$.

5.42. В закрытом сосуде объемом $V= 10$ л находится воздух при давлении $p = 0,1$ МПа. Какое количество Q теплоты надо сообщить воздуху, чтобы повысить давление в сосуде в 5 раз?

Ответ: $Q = 10$ кДж.

5.43. Какую массу m углекислого газа можно нагреть при $p=\text{const}$ от температуры $t_1 = 20$ °С до температуры $t_2 = 100$ °С количеством теплоты $Q=222$ Дж? На сколько при этом изменится кинетическая энергия одной молекулы?

Ответ: $m=3,67$ г, $\Delta W=3,31 \cdot 10^{-21}$ Дж.

5.44. В закрытом сосуде объемом $V= 2$ л находится азот, плотность которого $\rho = 1,4$ кг/м³. Какое количество Q теплоты надо сообщить азоту, чтобы нагреть его на $\Delta T=100$ К?

Ответ: $Q = 207,75$ Дж.

5.45. Азот находится в закрытом сосуде объемом $V= 3$ л при температуре $t_1= 27$ °С и давлении $p_1 = 0,3$ МПа. После нагревания давление в сосуде повысилось до $p_2 = 2,5$ МПа. Найти температуру t_2 азота после нагревания и количество теплоты Q , сообщенное азоту.

Ответ: $T_2=2500$ К, $Q = 16,5$ кДж.

5.46. Для нагревания некоторой массы газа на $\Delta t_1 = 50$ °С при $p=\text{const}$ необходимо затратить количество теплоты $Q_1=670$ Дж. Если эту же массу газа охладить на $\Delta t_2 = 100$ °С при $V=\text{const}$, то выделяется количество теплоты $Q_2=1005$ Дж. Какое число степеней свободы i имеют молекулы этого газа?

Ответ: $i=6$.

5.47. Масса $m = 10$ г кислорода находится при давлении $p = 300$ кПа и температуре $t= 10$ °С. После нагревания при $p=\text{const}$ газ занял объем $V= 10$ л. Найти количество теплоты Q , полученное газом, изменение ΔW

внутренней энергии газа и работу A , совершенную газом при расширении.

Ответ: $Q = 7,92$ кДж, $\Delta W = 5,66$ кДж, $A = 2,26$ кДж.

5.48. Масса $m = 6,5$ г водорода, находящегося при температуре $t = 27$ °С, расширяется вдвое при $p = \text{const}$ за счет притока тепла извне. Найти работу A расширения газа, изменение ΔW внутренней энергии газа и количество теплоты Q , сообщенное газу.

Ответ: $A = 8,1$ Дж, $\Delta W = 20,25$ кДж, $Q = 28,35$ кДж.

5.49. В закрытом сосуде находится масса $m_1 = 20$ г азота и масса $m_2 = 32$ г кислорода. Найти изменение ΔW внутренней энергии смеси газов при охлаждении её на $\Delta T = 28$ К.

Ответ: $\Delta W = 1$ кДж.

5.50. Количество $\nu = 2$ кмоль углекислого газа нагревается при постоянном давлении на $\Delta T = 50$ К. Найти изменение ΔW внутренней энергии газа, работу A расширения газа и количество теплоты Q , сообщенное газу.

Ответ: $\Delta W = 2,5$ МДж, $A = 0,83$ МДж, $Q = 3,32$ МДж.

5.51. Какое количество тепла необходимо сообщить воде кипящей при нормальном атмосферном давлении, чтобы превратить $m = 1,00$ кг воды в пар?

Ответ: $Q = 2,4$ МДж.

5.52. Теплоизолированный сосуд с газом, молярная масса которого M и $\frac{C_p}{C_v} = \gamma$, движется со скоростью V , найти приращение температуры газа при внезапной остановке сосуда.

Ответ: $\Delta T = \frac{MV^2(\gamma - 1)}{2R}$.

5.53. Имеется идеальный газ, молярная теплоемкость которого при постоянном объеме равна C_v . Найти молярную теплоемкость этого газа как функцию его объема V , если газ совершает процесс по закону:
а) $T = T_0 e^{\alpha V}$, б) $p = p_0 e^{\alpha V}$.

Ответ: $C = C_v + \frac{R}{\alpha V}$; $C = C_v + \frac{R}{1 + \alpha V}$.

5.54. Вычислить удельные теплоемкости c_v и c_p для газовой смеси, состоящей из 7 г азота и 20 г аргона. Газы считать идеальными.

Ответ: $c_v = 0,65$ Дж/(гК), $c_p = 0,42$ Дж/(гК).

5.55. Газ, состоящий из жестких двухатомных молекул, расширили политропически так, что частота ударов молекул о стенку сосуда не изменилась. Найти молярную теплоемкость газа в этом процессе.

Ответ: $C=3R$.

П.1.3 Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам. Адиабатный процесс

5.56. Двухатомному газу сообщено количество теплоты $Q=2,093$ кДж. Газ расширяется при $p=\text{const}$. Найти работу A расширения газа.

Ответ: $A = 598$ Дж.

5.57. При изобарическом расширении двухатомного газа была совершена работа $A=156,8$ Дж. Какое количество теплоты Q было сообщено газу?

Ответ: $Q = 550$ Дж.

5.58. В закрытом сосуде объемом $V= 5$ л находится воздух при давлении $p = 200$ кПа и температуре $t= 17$ °С. При изобарическом расширении газа была совершена работа $A=196$ Дж. Найти изменение температуры при нагревании газа.

Ответ: $\Delta T = 57$ К.

5.59. Масса $m = 7$ г углекислого газа была нагрета на $\Delta T=10$ К в условиях свободного расширения. Найти работу A расширения газа и изменение ΔW его внутренней энергии.

Ответ: $A = 13,2$ Дж, $\Delta W = 39,6$ Дж

5.60. Количество $\nu=1$ кмоль многоатомного газа нагревается на $\Delta T=100$ К в условиях свободного расширения. Найти количество теплоты Q , сообщенное газу, изменение ΔW его внутренней энергии и работу A расширения газа.

Ответ: $Q = 3,32$ МДж, $\Delta W = 2,49$ МДж, $A = 831$ кДж.

5.61. В сосуде под поршнем находится масса $m = 1$ г азота. Какое количество теплоты Q надо затратить, чтобы нагреть азот на $\Delta T=10$ К? На сколько при этом поднимется поршень? Масса поршня $M=1$ кг, площадь его поперечного сечения $S=10$ см². Давление под поршнем $p= 100$ кПа.

Ответ: $Q = 10,39$ Дж, $\Delta h = 2,7$ см.

5.62. Масса $m=10,5$ г азота изотермически расширяется при температуре $t = - 23$ °С, причем его давление изменяется от $p_1=250$ кПа до $p_2=100$ кПа. Найти работу A , совершенную газом при расширении.

Ответ: $A = 831$ кДж.

5.63. При изотермически расширении массы $m=10$ г азота, находящегося при температуре $t=17$ °С, была совершена работа $A=860$ Дж. Во сколько раз изменилось давление азота при расширении?

Ответ: $p_1/p_2=2,72$.

5.64. Работа изотермического расширения массы $m=10$ г некоторого газа от объема V_1 до $V_2=2V_1$ оказалась равной $A=575$ Дж. Найти среднюю квадратичную скорость $\langle v_{кв} \rangle$ молекул газа при этой температуре.

Ответ: $\langle v_{кв} \rangle=500$ м/с.

5.65. Гелий, находящийся при нормальных условиях, изотермически расширяется от объема $V_1=1$ л до $V_2=2$ л. Найти работу A , совершенную газом при расширении и количество теплоты Q , сообщенное газу.

Ответ: $Q=70$ Дж, $A=70$ Дж.

5.66. При изобарическом расширении газа, занимавшего объем $V=2$ м³, давление его меняется от $p_1=0,5$ МПа до $p_2=0,4$ МПа. Найти работу A , совершенную при этом.

Ответ: $A=223$ кДж.

5.67. Два моля идеального газа при температуре 300 К охладил изохорически, вследствие чего его давление уменьшилось в два раза. Затем газ изобарно расширили так, что в конечном состоянии, его температура стала равной первоначальной. Найти количество теплоты, поглощенной газом в данном процессе.

Ответ: $Q=2,5$ кДж

5.68. Камеру объемом $V=87$ л откачивают насосом, скорость откачки которого $C=10$ л/с. Через сколько времени давление в камере уменьшится в 1000 раз?

Ответ: $t=60$ с.

5.69. До какой температуры t_2 охладится воздух, находящийся при $t_1=0$ °С, если он расширяется адиабатически от объема V_1 до $V_2=2V_1$?

Ответ: $T_2=206,89$ К.

5.70. Объем $V_1=7,5$ л кислорода адиабатически сжимается до объема $V_2=1$ л, причем в конце сжатия установилось давление $p_2=1,6$ МПа. Под каким давлением p_1 находился газ до сжатия?

Ответ: $p_1=95$ кПа.

5.71. При адиабатическом сжатии воздуха в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания давление изменяется от $p_1=0,1$ МПа до $p_2=3,5$ МПа. Начальная температура воздуха $t_1=40$ °С. Найти температуру воздуха t_2 в конце сжатия.

Ответ: $T_2=862,86$ К.

5.72. Газ расширяется адиабатически, причем объем его увеличивается вдвое, а термодинамическая температура падает в 1,32 раза. Какое число степеней свободы i имеют молекулы этого газа?

Ответ: $i=5$.

5.73. Двухатомный газ, находящийся при давлении $p_1=2$ МПа и температуре $t_1=27$ °С, сжимается адиабатически от объема V_1 до $V_2=0,5V_1$. Найти температуру t_2 и давление p_2 после сжатия.

Ответ: $T_2=395,85$ К, $p_2=5,28$ МПа.

5.74. В сосуде под поршнем находится гремучий газ, занимающий при нормальных условиях объема $V_1=0,1$ л. При быстром сжатии газ воспламеняется. Найти температуру T воспламенения гремучего газа, если известно, что работа сжатия $A=46,35$ Дж.

Ответ: $T=774,13$ К.

5.75. В сосуде под давлением находится газ при нормальных условиях. Расстояние между дном сосуда и дном поршня $h=25$ см. Когда на поршень положили груз массой $m=20$ кг, поршень опустился на $\Delta h=13,4$ см. Считая сжатие адиабатическим, найти для данного газа отношение C_p/C_v . Площадь поперечного сечения поршня $S=10$ см². Массой поршня пренебречь.

Ответ: $c_p/c_v=1,4$.

5.76. Двухатомный газ занимает объем $V_1=0,5$ л при давлении $p_1=50$ кПа. Газ сжимается адиабатически до некоторого объема V_2 и давления p_2 . Затем он охлаждается при $V_2=\text{const}$ до первоначальной температуры, причем его давление становится равным $p_0=100$ кПа. Начертить график этого процесса. Найти объем V_2 и давление p_2 .

Ответ: $V_2=0,25$ л, $p_2=132$ кПа.

5.77. Газ расширяется адиабатически так, что его давление падает от $p_1=200$ кПа до $p_2=100$ кПа. Затем он нагревается при постоянном объеме до первоначальной температуры, причем его давление становится равным $p=122$ кПа. Найти отношение C_p/C_v для этого газа. Начертить график этого процесса.

Ответ: $c_p/c_v=1,4$.

5.78. Количество $\nu=1$ кмоль азота, находящегося при нормальных условиях расширяется адиабатически от объема V_1 до $V_2=5V_1$. Найти изменение ΔW внутренней энергии газа и работу A , совершенную газом при расширении.

Ответ: $\Delta W = -2,69$ МДж, $A=2,69$ МДж.

5.79. Необходимо сжать воздух от объема $V_1=10$ л до $V_2=2$ л. Как выгоднее его сжимать (адиабатически или изотермически)?

Ответ: изотермически.

5.80. При адиабатическом сжатии количества $\nu=1$ кмоль двухатомного газа была совершена работа $A=146$ Дж. На сколько увеличилась температура газа при сжатии?

Ответ: $\Delta T=7$ К.

5.81. Во сколько раз уменьшится средняя квадратичная скорость молекул двухатомного газа при адиабатическом увеличении объема газа в два раза?

Ответ: $\frac{\langle v_{кв1} \rangle}{\langle v_{кв2} \rangle} = 1,15$.

5.82. Масса $m = 10$ г кислорода, находящегося при нормальных условиях, сжимается до объема $V_2=1,4$ л. Найти давление p_2 и температуру t_2 кислорода после сжатия, если кислород сжимается: 1) изотермически, 2) адиабатически. Найти работу A сжатия в каждом из этих случаев.

Ответ: $A=-1,14$ кДж, $A=-1,605$ кДж.

5.83. Масса $m = 28$ г азота, находящегося при температуре $t_1=40$ °С и давлении $p_1=100$ кПа, сжимается до объема $V_2=13$ л. Найти температуру t_2 и давление p_2 азота после сжатия, если азот сжимается: 1) изотермически, 2) адиабатически. Найти работу A сжатия в каждом из этих случаев.

Ответ: $A=-1,8$ кДж, $A=-2,08$ кДж.

5.84. Во сколько раз возрастает длина свободного пробега молекул двухатомного газа, если его давление падает вдвое при расширении газа: 1) изотермически, 2) адиабатически?

Ответ: $\frac{\langle \lambda_2 \rangle}{\langle \lambda_1 \rangle} = 1,64$.

5.85. Два различных газа, из которых один одноатомный, а другой двухатомный, находятся при одинаковых температурах и занимают одинаковые объемы. Газы сжимаются адиабатически так, что объем их уменьшается вдвое. Какой из газов нагреется больше и во сколько раз?

Ответ: одноатомный в 1,2 раза.

5.86. Масса $m = 1$ кг воздуха, находящегося при давлении $p_1 = 150$ кПа и температуре $t_1 = 30$ °С, расширяется адиабатически и давление при этом падает до $p_2 = 100$ кПа. Во сколько раз увеличится объем воздуха? Найти конечную температуру t_2 и работу A , совершенную газом при расширении.

Ответ: $T = 720$ К, $A = 24$ кДж.

5.87. Количество $\nu = 1$ кмоль кислорода находится при нормальных условиях, а затем его объем увеличивается до $V = 5V_0$. Построить график зависимости $p = f(V)$, приняв за единицу по оси абсцисс значение V_0 , если кислород расширяется: 1) изотермически, 2) адиабатически. Значения давления p найти для объемов, равных: $V_0, 2V_0, 3V_0, 4V_0$ и $5V_0$.

Ответ: 1) изотерма $p_0 = 101,3$ кПа, $p_1 = 38,386$ кПа, $p_2 = 21,759$ кПа, $p_3 = 14,545$ кПа, $p_4 = 10,643$ кПа;

2) адиабата $p_0 = 101,3$ кПа, $p_1 = 50,65$ кПа, $p_2 = 33,767$ кПа, $p_3 = 25,325$ кПа, $p_4 = 20,260$ кПа.

5.88. Найти молярную теплоемкость идеального газа при политропическом процессе $pV^n = \text{const}$, если показатель адиабаты газа равен γ . При каких значениях показателя политропы n теплоемкость газа будет отрицательной?

Ответ: $C < 0$, при $1 < n < \gamma$.

5.89. Во сколько раз надо расширить адиабатически газ, состоящий из жестких двухатомных молекул, чтобы их средняя квадратичная скорость уменьшилась в $\eta = 2,0$ раза?

Ответ: в 7,59 раза.

5.90. Имеется идеальный газ с показателем адиабаты γ . Его молярная теплоемкость при некотором процессе изменяется по закону $C = \alpha/T$, где α – постоянная. Найти: а) работу совершенную одним молем газа при его нагревании от T_0 до температуры в η раз большей; б) уравнение процесса в параметрах P, V .

Ответ: $A = \alpha \ln \eta - \frac{2}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} R \Delta T = \alpha \ln \eta - \frac{RT_0(\eta - 1)}{\gamma - 1}$, $PV^\gamma e^{\alpha(\gamma-1)/PV} = \text{const}$.

5.91. Во сколько раз изменится число ударов жестких двух атомных молекул газа о поверхность стенки в единицу времени, если газ адиабатно расширился в η раз.

Ответ: число ударов уменьшается в $\eta^{\frac{i+1}{i}}$ раз, где $i=5$.

5.92. Вычислить величину $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ для газовой смеси, состоящей из $\nu=2$ моля кислорода и $\nu=3$ моля углекислого газа. Газы считать идеальными.

Ответ: $\gamma = \frac{\nu_1 \gamma_1 (\gamma_2 - 1) + \nu_2 \gamma_2 (\gamma_1 - 1)}{\nu_1 (\gamma_2 - 1) + \nu_2 (\gamma_1 - 1)} = 1,33$.

5.93. Объем газа, состоящего из жестких двухатомных молекул, увеличили в $\eta=2,0$ раза по политропе с молярной теплоемкостью $C = R$. Во сколько раз изменилась при этом частота ударов молекул о стенку сосуда?

Ответ: $\frac{\nu_1}{\nu_2} = 2,5$.

5.94. Пусть газ нагрет до температуры, при которой у молекул возбуждены все степени свободы (поступательные, вращательные и колебательные). Найти молярную теплоемкость такого газа при изохорическом процессе, а также показатель адиабаты γ , если газ состоит из молекул:

- а) двухатомных;
- б) линейных N-атомных;
- в) объемных N-атомных.

Ответ: а) $i=7$, б) $i=6N-5$, в) $i=6N-6$.

ГЛАВА 2. Статистические распределения

П.2.1 Вероятность и флуктуации. Распределение Максвелла и его зависимость от температуры. Средние значения скоростей и наиболее вероятная скорость

5.95. Вычислить с помощью распределения Максвелла число ν молекул газа, падающих в единицу времени на единичную площадку, если концентрация молекул n , температура T , масса каждой молекулы m .

Ответ: $\langle \nu \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$.

5.96. Идеальный газ, состоящий из молекул массы m с концентрацией n , имеет температуру T . Найти с помощью распределения Максвелла число молекул, падающих в единицу времени на единицу поверхности стенки под углами ϑ , $\vartheta + d\vartheta$ к ее нормали.

$$\text{Ответ: } d\nu = \int_{\nu=0}^{\infty} dn \left(\frac{d\Omega}{4\pi} \right) \nu \cos \vartheta = n \left(\frac{2kT}{\pi m} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot d\vartheta.$$

5.97. Какова вероятность W того, что данная молекула идеального газа имеет скорость, отличную от $v_B/2$ не более чем на 1 %.

5.98. Найти вероятность W того, что данная молекула идеального газа имеет скорость, отличную от $2v_B$ не более чем на 1% .

$$\text{Ответ: } W = 0,66\% .$$

5.99. Определить относительное число ω молекул идеального газа, скорости которых заключены в пределах от нуля до одной сотой наиболее вероятной скорости v_B .

5.100. Зная функцию распределения молекул по скоростям, определить среднюю арифметическую скорость $\langle v \rangle$ молекул.

$$\text{Ответ: } \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{m}} .$$

5.101. По функции распределения молекул по скоростям определить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{кв} \rangle$.

$$\text{Ответ: } \langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}} .$$

5.102. Зная функцию распределения молекул по скоростям в некотором молекулярном пучке $f(v) = \frac{m^2}{2k^2T^2} e^{-mv^2/(2kT)} v^3$, найти выражения: 1) для наиболее вероятной скорости v_B ; 2) средней арифметической скорости $\langle v \rangle$.

$$\text{Ответ: } v_B = \sqrt{\frac{3kT}{m}} .$$

5.103. Водород находится при нормальных условиях и занимает объем $V = 1 \text{ см}^3$. Определить число N молекул в этом объеме, обладающих скоростями, меньшими некоторого значения $v_{\max} = 1 \text{ м/с}$.

5.104. Вывести формулу наиболее вероятного импульса p_B молекул идеального газа.

5.105. Найти число N молекул идеального газа, которые имеют импульс, значение которого точно равно наиболее вероятному значению p_v .

5.106. Вывести формулу, определяющую среднее значение компонента импульса $\langle p_x \rangle$ молекул идеального газа.

5.107. Найти выражение средней кинетической энергии $\langle \varepsilon \rangle$ поступательного движения молекул. Функцию распределения молекул по энергиям считать известной.

Ответ: $\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT$.

5.108. Определить долю ω молекул идеального газа, энергии которых отличаются от средней энергии $\langle \varepsilon \rangle$ поступательного движения молекул при той же температуре не более чем на 1 % .

5.109. Определить долю ω молекул, энергия которых заключена в пределах от $\varepsilon_1=0$ до $\varepsilon_2=0,01kT$.

5.110. Число молекул, энергия которых выше некоторого значения ε_1 , составляет 0,1 от общего числа молекул. Определить величину ε_1 в долях kT , считая, что $\varepsilon_1 \gg kT$.

Указание. Получающееся трансцендентное уравнение решить графически.

5.111. Используя функцию распределения молекул по энергиям, определить наиболее вероятное значение энергии ε_v .

Ответ: $\varepsilon_v = 0,5kT$.

5.112. Найти относительное число ω молекул идеального газа, кинетические энергии которых отличаются от наиболее вероятного значения ε_v энергии не более чем на 1 %.

5.113. Определить относительное число ω молекул идеального газа, кинетические энергии которых заключены в пределах от нуля до значения, равного $0,01 \varepsilon_v$ (ε_v - наиболее вероятное значение кинетической энергии молекул).

5.114. Найти выражение для кинетической энергии молекул идеального газа, импульсы которых имеют наиболее вероятное значение p_v .

5.115. Во сколько раз изменится значение максимума функции $f(\epsilon)$ распределения молекул идеального газа по энергиям, если температура T газа увеличится в два раза? Решение пояснить графиком.

П.2.2 Распределение числа частиц по высоте. Распределение Больцмана. Распределение Максвелл-Больцмана

5.116. На сколько уменьшится атмосферное давление $p_0=100\text{кПа}$ при подъеме наблюдателя над поверхностью Земли на высоту $h=100\text{м}$? Считать, что температура T воздуха равна 290К и не изменяется с высотой.

5.117. Пусть η_0 - отношение концентрации молекул водорода к концентрации молекул азота вблизи поверхности Земли, а η - то же отношение на высоте $h=3000\text{м}$. Найти отношение $\frac{\eta}{\eta_0}$ при $T=280\text{К}$, полагая, что температура и ускорение свободного падения не зависят от высоты.

5.118. В длинном вертикальном сосуде находится газ, состоящий из двух сортов молекул с массами m_1 и m_2 , причем $m_2 > m_1$. Концентрации этих молекул у дна сосуда равны соответственно n_1 и n_2 , причем $n_2 > n_1$. Считая, что по всей высоте поддерживается одна и та же температура T и ускорение свободного падения равно g , найти высоту h , на которой концентрации этих сортов молекул будут одинаковы.

Ответ: $h = \frac{kT \ln(n_2/n_1)}{(m_2 - m_1)g}$.

5.119. В очень высоком вертикальном цилиндрическом сосуде находится углекислый газ при некоторой температуре T . Считая поле тяжести однородным, найти, как изменится давление газа на дно сосуда, если температуру газа увеличить в n раз.

Ответ: не изменится.

5.120. Пылинки, взвешенные в воздухе, имеют массу $m=10^{-18}\text{г}$. Во сколько раз уменьшится их концентрация n при увеличении высоты на $\Delta h=10\text{м}$? Температура воздуха $T = 300\text{К}$.

5.121. Одинаковые частицы массой $m=10^{-12}\text{г}$ каждая распределены в однородном гравитационном поле напряженностью $G=0,2\text{ мкН/кг}$. Определить отношение n_1/n_2 концентраций частиц, находящихся на

эквипотенциальных уровнях, отстоящих друг от друга на $\Delta z = 10$ м. Температура T во всех слоях считается одинаковой и равной 290 К.

5.122. Масса m каждой из пылинок, взвешенных в воздухе, равна 1нг. Отношение концентрации n_1 пылинок на высоте $h_1 = 1$ м к концентрации n_0 их на высоте $h_0 = 0$ равно 0,787. Температура воздуха $T = 300$ К. Найти по этим данным значение постоянной Авогадро N_A .

5.123. Определить силу F , действующую на частицу, находящуюся во внешнем однородном поле силы тяжести, если отношение n_1/n_2 концентраций частиц на двух уровнях, отстоящих друг от друга на $\Delta z = 1$ м, равно e . Температуру T считать везде одинаковой и равной 300 К.

5.124. На сколько уменьшится атмосферное давление $p = 100$ кПа при подъеме наблюдателя над поверхностью Земли на высоту $h = 100$ м? Считать, что температура T воздуха равна 290 К и не изменяется с высотой.

5.125. На какой высоте h над поверхностью Земли атмосферное давление вдвое меньше, чем на ее поверхности? Считать, что температура T воздуха равна 290 К и не изменяется с высотой.

5.126. Барометр в кабине летящего вертолета показывает давление $p = 90$ кПа. На какой высоте h летит вертолет, если на взлетной площадке барометр показывал давление $p_0 = 100$ кПа? Считать, что температура T воздуха равна 290 К и не изменяется с высотой.

5.127. Найти изменение высоты Δh , соответствующее изменению давления на $\Delta p = 100$ Па, в двух случаях: 1) вблизи поверхности Земли, где температура $T_1 = 290$ К, давление $p_1 = 100$ кПа; 2) на некоторой высоте, где температура $T_2 = 220$ К, давление $p_2 = 25$ кПа.

5.128. Барометр в кабине летящего самолета всё время показывает одинаковое давление $p = 80$ кПа, благодаря чему летчик считает высоту h полета неизменной. Однако температура воздуха изменилась на $\Delta T = 1$ К. Какую ошибку Δh в определении высоты допустил летчик? Считать что температура не зависит от высоты и что у поверхности Земли давление $p_0 = 100$ кПа.

5.129. Ротор центрифуги, заполненный радоном, вращается с частотой $n = 50$ с⁻¹. Радиус r ротора равен 0,5 м. Определить давление p газа на стенке ротора, если в центре давление p_0 равно нормальному атмосферному. Температуру T по всему объему считать одинаковой и равной 300 К.

Глава 3. Основы термодинамики

П.3.1 Цикл Карно. Максимальный КПД тепловой машины

5.130. Идеальный газ совершает цикл Карно, термический КПД которого равен 0,4. Определите работу изотермического сжатия газа, если работа изотермического расширения составляет 400 Дж.

Ответ: $A = -240$ Дж.

5.131. Многоатомный идеальный газ совершает цикл Карно, при этом в процессе адиабатного расширения объем газа увеличивается в $n=4$ раза. Определить термический КПД цикла.

Ответ: $\eta = 37\%$.

5.132. Найти КПД цикла, состоящего из двух изохор и двух адиабат, если в пределах цикла объем идеального газа изменяется в $n = 10$ раз. Рабочим веществом является азот.

Ответ: $\eta = 60\%$.

5.133. Вычислить КПД цикла, состоящего из изотермы, изобары и изохоры, если при изотермическом процессе объем идеального газа с показателем адиабаты γ : а) увеличивается в n раз; б) уменьшается в n раз.

Ответ: $\eta = 1 - n^{-(1-1/\gamma)}$.

5.134. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, за цикл получает от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 2,512$ кДж. Температура нагревателя $T_1 = 400$ К, температура холодильника $T_2 = 300$ К. Найти работу A , совершаемую машиной за один цикл, и количество теплоты Q_2 , отдаваемое холодильнику за один цикл.

Ответ: $A = 630$ Дж, $Q_2 = 1,88$ кДж.

5.135. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 2,94$ кДж и отдает за один цикл холодильнику количество теплоты $Q_2 = 13,4$ кДж. Найти КПД η цикла.

Ответ: $\eta = 18\%$.

5.136. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 73,5$ кДж. Температура нагревателя $t_1 = 100$ °С, температура холодильника $t_2 = 0$ °С. Найти КПД η цикла, количество теплоты Q_1 , получаемое машиной за один цикл от нагревателя, и количество теплоты Q_2 , отдаваемое холодильнику за один цикл.

Ответ: $\eta = 26,8\%$, $Q_1 = 274$ кДж, $Q_2 = 200$ кДж.

5.137. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. При этом 80 % количества теплоты, получаемого от нагревателя, передается холодильнику. Машина получает от нагревателя количество теплоты $Q_1=6,28$ кДж. Найти КПД η цикла и работу A , совершаемую машиной за один цикл.

Ответ: $\eta=20\%$, $A= 1,256$ кДж.

5.138. Идеальная холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, передает тепло от холодильника с водой при температуре $t_2 = 0$ °С кипятильнику с водой при температуре $t_1 = 100$ °С. Какую массу m_2 нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар массу $m_1= 1$ кг воды в кипятильнике.

Ответ: $m_2=4,94$ кг.

5.139. Паровая машина мощностью $P=14,7$ кВт потребляет за время $t=1$ ч работы массу $m=8,1$ кг угля с удельной теплотой сгорания $q=33$ МДж/кг. Температура котла $t_1=200$ °С, температура холодильника $t_2=58$ °С. Найти фактический КПД η машины и сравнить его с КПД η' идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно между теми же температурами.

Ответ: $\eta=19,8\%$, $\eta'=30\%$.

5.140. В цилиндрах карбюраторного двигателя внутреннего сгорания газ сжимается политропически до $V_2= V/6$. Начальное давление $p_1= 90$ кПа, начальная температура $t_1 = 127$ °С. Найти давление p_2 и температуру t_2 газа в цилиндрах после сжатия. Показатель политропы $n=1,3$.

Ответ: $p_2=934$ кПа, $T_2=684,7$ К.

5.141. Воспользовавшись неравенством Клаузиуса, показать, что КПД всех циклов, у которых одинаковы максимальная температура T_{\max} и минимальная T_{\min} , меньше, чем у цикла Карно при T_{\max} и T_{\min} .

Ответ: $\frac{Q'_2}{Q_1} > \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \Rightarrow \eta < \eta_{\text{Карно}}$.

5.142. Показать с помощью теоремы Карно, что для физически однородного вещества, состояние которого характеризуется параметрами T и V , $(\partial U / \partial V)_T = T(\partial p / \partial T)_V - p$, где $U(T,V)$ – внутренняя энергия вещества.

Ответ: Использовать бесконечно малый цикл Карно на диаграмме p, V .

П.3.2 Энтропия. Принцип возрастания энтропии

5.143. Воду массы $m = 1,00$ кг нагрели до температуры $t_1 = 10$ °С до $t_2 = 100$ °С, при которой она вся превратилась в пар. Считая пар идеальным газом, найти приращение энтропии системы.

Ответ: $\Delta S = 7,2$ кДж/К.

5.144. Кусок льда массы $m_1 = 100$ г при температуре $t_1 = 0$ °С поместили в калориметр, в котором находилась вода массы $m_2 = 100$ г при t_2 . Пренебрегая теплоемкостью калориметра, найти приращение энтропии системы к моменту установления теплового равновесия. Рассмотрим два случая: а) $t_2 = 60$ °С, б) $t_2 = 94$ °С.

Ответ: а) $\Delta S = 9,2$ Дж; б) $\Delta S = 18$ Дж.

5.145. Найти изменение ΔS энтропии при переходе массы $m = 8$ г кислорода от объема $V_1 = 10$ л при температуре $t_1 = 80$ °С к объему $V_2 = 40$ л при температуре $t_2 = 300$ °С.

Ответ: $\Delta S = 5,4$ Дж/К.

5.146. Найти изменение ΔS энтропии при переходе массы $m = 6$ г водорода от объема $V_1 = 20$ л под давлением $p_1 = 150$ кПа к объему $V_2 = 60$ л под давлением $p_2 = 100$ кПа.

Ответ: $\Delta S = 71$ Дж/К.

5.147. Масса $m = 6,6$ г водорода расширяется изобарически от объема V_1 до объема $V_2 = 2 V_1$. Найти изменение ΔS энтропии при этом расширении.

Ответ: $\Delta S = 66,3$ Дж/К.

5.148. Найти изменение ΔS энтропии при изобарическом расширении массы $m = 8$ г гелия от объема $V_1 = 10$ л до объема $V_2 = 25$ л.

Ответ: $\Delta S = 38,1$ Дж/К.

5.149. Найти изменение ΔS энтропии при изотермическом расширении массы $m = 6$ г водорода от давления $p_1 = 100$ кПа до давления $p_2 = 50$ кПа.

Ответ: $\Delta S = 17,3$ Дж/К.

5.150. Масса $m = 10,5$ г азота изотермически расширяется от объема $V_1 = 2$ л до объема $V_2 = 5$ л. Найти изменение ΔS энтропии при этом процессе.

Ответ: $\Delta S = 2,85$ Дж/К.

5.151. Масса $m=10$ г нагревается от температуры $t_1 = 50$ °С до температуры $t_2 = 150$ °С. Найти изменение ΔS энтропии, если нагревание происходит: 1) изохорически, 2) изобарически.

Ответ: $\Delta S=1,75$ Дж/К, $\Delta S=2,45$ Дж/К.

5.152. При нагревании количества $\nu= 1$ кмоль двухатомного газа его термодинамическая температура увеличивается от T_1 до $T_2=1,5 T_1$. Найти изменение ΔS энтропии, если нагревание происходит: 1) изохорически, 2) изобарически.

Ответ: $\Delta S=8,5$ кДж/К, $\Delta S=11,8$ кДж/К.

5.153. В результате нагревании массы $m=22$ г азота его термодинамическая температура увеличилась от T_1 до $T_2=1,2 T_1$, а энтропия увеличилась на $\Delta S=4,19$ Дж/К. При каких условиях производилось нагревание азота (при постоянном объеме или при постоянном давлении)?

Ответ: при постоянном давлении.

5.154. Объем $V_1=1$ м³ воздуха, находящегося при температуре $t_1 = 0$ °С и давлении $p_1= 98$ кПа, изотермически расширяется от объема V_1 до объема $V_2=2 V_1$. Найти изменение ΔS энтропии при этом процессе.

Ответ: $\Delta S=500$ Дж/К

5.155. Идеальный газ в количестве $\nu = 2,2$ моля находится в одном из двух теплоизолированных сосудов, соединенных между собой трубкой с краном. В другом сосуде — вакуум. Кран открыли, и газ заполнил оба сосуда, увеличив свой объем в $n = 3,0$ раза. Найти приращение энтропии газа.

Ответ: $\Delta S=20$ Дж/К

5.156. Изменение энтропии в тепловой машине, работающей по циклу Карно, за один цикл равно 10^4 Дж/К. Определить полезную работу, если температура нагревателя 320°C , холодильника 20°C .

Ответ: $A=2,93 \cdot 10^6$ Дж.

5.157. Кусок меди массой $m_1=300$ г при $t_1=97$ °С поместили в калориметр, где находится вода массой $m_2=100$ г при $t_2=97$ °С. Найти приращение энтропии системы к моменту выравнивания температур. Теплоемкость калориметра пренебрежимо мала.

Ответ: $\Delta S= 4,4$ Дж/К.

5.158. Два одинаковых теплоизолированных сосуда, соединенные трубкой с краном, содержат по одному молю одного и того же идеального газа. Температура газа в одном сосуде – T_1 , в другом – T_2 . Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме равна C_v . После открывания крана газ пришел в новое состояние равновесия. Найти ΔS – приращение энтропии газа. Показать, что $\Delta S > 0$.

Ответ: $\Delta S = C_v \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1T_2}$.

5.159. Найти приращение энтропии одного моля углекислого газа при увеличении его абсолютной температуры в $n = 2$ раза, если процесс нагревания:

а) изохорический

б) изобарический

Газ считать идеальным.

Ответ: $\Delta S = 19 \frac{\text{Дж}}{\text{Кмоль}}$, $\Delta S = 25 \frac{\text{Дж}}{\text{Кмоль}}$

5.160. N атомов газообразного гелия находится при комнатной температуре в кубическом сосуде, объем которого равен 1 см^3 . Найти вероятность того, что все атомы соберутся в одной половине сосуда.

Ответ: $P = (1/2)^N$.

Глава 4. Фазовые равновесия и фазовые превращения. Конденсированное состояние

П.4.1 Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Критическое состояние. Эффект Джоуля-Томсона

5.161. Какую температуру T имеет масса $m=2\text{г}$ азота, занимающего объем $V= 820 \text{ см}^3$ при давлении $p=0,2 \text{ МПа}$? Газ рассматривать: 1) как идеальный, 2) реальный.

Ответ: $T= 280 \text{ К}$.

5.162. Количество $\nu=1 \text{ кмоль}$ кислорода находится при температуре $t_1=27 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $p=10 \text{ МПа}$. Найти объем V газа, считая, что кислород при данных условиях ведет себя как реальный газ.

Ответ: $V=231 \text{ л}$.

5.163. Найти эффективный диаметр σ молекулы кислорода, считая известными для кислорода критические значения $T_k=154 \text{ К}$ и $p_k=5,07 \text{ МПа}$.

Ответ: $\sigma=294 \cdot 10^{-12} \text{ м}$.

5.164. Найти эффективный диаметр σ молекулы азота двумя способами: 1) по данному значению средней длины свободного пробега молекул при нормальных условиях $\langle \lambda \rangle = 95$ нм; 2) по известному значению постоянной b в уравнении Ван-дер-Ваальса.

Ответ: $\sigma = 298 \cdot 10^{-12}$ м, $\sigma = 313 \cdot 10^{-12}$ м.

5.165. Найти среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекул углекислого газа при нормальных условиях. Эффективный диаметр σ молекулы вычислить, считая известными для углекислого газа критические значения $T_k = 304$ К и $p_k = 7,38$ МПа.

Ответ: $\langle \lambda \rangle = 80$ нм.

5.166. Найти коэффициент диффузии D гелия при температуре $t = 17$ °С и давлении $p = 150$ кПа. Эффективный диаметр атома σ вычислить, считая известными для гелия критические значения $T_k = 5,2$ К и $p_k = 0,23$ МПа.

Ответ: $D = 3,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

5.167. Найти давление p_i , обусловленное силами взаимодействия молекул, заключенных в количестве $\nu = 1$ кмоль газа при нормальных условиях. Критическая температура и критическое давление этого газа равны $T_k = 417$ К и $p_k = 7,7$ МПа.

Ответ: $p_i = 1,31$ кПа.

5.168. Какому давлению необходимо подвергнуть углекислый газ при температуре $T = 300$ К, чтобы его плотность оказалась равной $\rho = 500$ г/л? Расчет провести как для идеального газа, так и для газа Ван-дер-Ваальса.

Ответ: 1) $p = 280 \cdot 10^5$ Па, 2) $p = 86 \cdot 10^5$ Па.

5.169. Записать уравнение Ван-дер-Ваальса в приведенных параметрах π, ν, τ , приняв за единицы давления, объема и температуры соответствующие критические величины. Используя полученное уравнение, найти, во сколько раз температура газа больше его критической температуры, если давление газа в 12 раз больше критического, а объем вдвое меньше критического.

Ответ: $(\pi - \frac{3}{\nu^2})(3\nu - 1) = 8\tau$, подставляя значения параметров в полученную формулу получим 1,5.

5.170. Найти работу, совершаемую одним молем ван-дер-ваальсовского газа при изотермическом расширении его от объема V_1 до V_2 при температуре T .

Ответ: $A = RT \ln\left(\frac{V_2 - b}{V_1 - b}\right) + a\left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right)$.

5.171. 1 моль кислорода расширили от $V_1 = 1$ л до $V_2 = 5$ л при постоянной температуре $T=280\text{К}$. Вычислить: приращение внутренней энергии газа; количество поглощенного тепла. Газ считать ван-дер-ваальсовским.

Ответ: $\Delta U=0,11\text{кДж}$, $Q=3,8\text{кДж}$.

5.172. Один моль ван-дер-ваальсовского газа, имевший объем V_1 и температуру T_1 , переведен в состояние с объемом V_2 и температурой T_2 . Найти соответствующее приращение энтропии газа, считая его молярную теплоемкость C_v известной.

Ответ: $\Delta S=C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)+R \ln\left(\frac{V_2 - b}{V_1 - b}\right)$.

5.173. Вычислить температуру и плотность углекислого газа в критическом состоянии, считая газ ван-дер-ваальсовским.

Ответ: $T=0,3\text{кК}$, $\rho=340\text{г/см}^3$.

Глава 5. Физическая кинетика. Явления переносов

П.5.1 Средняя длина свободного пробега

5.174. Найти среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекул воздуха при нормальных условиях.

Ответ: $\langle \lambda \rangle=94,2\text{ нм}$.

5.175. Найти среднее число столкновений $\langle z \rangle$ в единицу времени молекул углекислого газа при температуре $t=100\text{ }^\circ\text{C}$, если средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle=870\text{ мкм}$.

Ответ: $\langle z \rangle=4,87 \cdot 10^5\text{ с}^{-1}$.

5.176. Найти среднее число столкновений $\langle z \rangle$ в единицу времени молекул азота при $p=53,33\text{ кПа}$ и температуре $t=27\text{ }^\circ\text{C}$.

Ответ: $\langle z \rangle=2,43 \cdot 10^9\text{ с}^{-1}$.

5.177. В сосуде объемом $V=0,5$ л находится кислород при нормальных условиях. Найти общее число столкновений Z между молекулами кислорода в этом объеме за единицу времени.

Ответ: $Z=3 \cdot 10^{31}$.

5.178. Во сколько раз уменьшится число столкновений $\langle z \rangle$ в единицу времени молекул двухатомного газа, если объем газа адиабатически увеличить в 2 раза?

Ответ: $\langle z_1 \rangle / \langle z_2 \rangle = 2,34$ нм.

5.179. Найти среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекул азота при $p = 10$ кПа и температуре $t = 17$ °С.

Ответ: $\langle \lambda \rangle = 1$ мкм.

5.180. Найти среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ атомов гелия, если известно, что плотность гелия $\rho = 0,021$ кг/м³.

Ответ: $\langle \lambda \rangle = 1,78$ мкм.

5.181. В сосуде объемом $V = 100$ см³ находится масса $m = 0,5$ г азота. Найти среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекул азота.

Ответ: $\langle \lambda \rangle = 23,2$ нм.

5.182. В сосуде находится углекислый газ, плотность которого $\rho = 1,7$ кг/м³. Средняя длина свободного пробега его молекул $\langle \lambda \rangle = 79$ нм. Найти диаметр σ молекул углекислого газа.

Ответ: $\sigma = 0,35$ нм.

5.183. В сферической колбе объемом $V = 1$ л, находится азот. При какой плотности ρ азота средняя длина свободного пробега молекул азота больше размеров сосуда?

Ответ: $\rho < 9,38 \cdot 10^{-7}$ кг/м³.

5.184. Вычислить, какая часть молекул газа:

а) пролетает без столкновений расстояния, превышающие среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$;

б) имеет длины свободного пробега в интервале от $\langle \lambda \rangle$ до $2\langle \lambda \rangle$.

Ответ: 0,267; 0,232.

5.185. Во сколько раз средняя длина свободного пробега молекулы азота, находящейся при нормальных условиях, больше среднего расстояния между молекулами.

Ответ: $\lambda / \langle r \rangle = 13$.

5.186. Азот находится при нормальных условиях. При какой частоте колебаний длина звуковой волны в нем будет равна средней длине свободного пробега молекул данного газа?

Ответ: $\nu=5.5$ ГГц.

П.5.2 Коэффициенты диффузии, теплопроводности и вязкости и их структура для газов

5.187. Найти коэффициент диффузии D водорода при нормальных условиях, если средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle = 0,16$ мкм.

Ответ: $D=9,6 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

5.188. Найти коэффициент диффузии D гелия при нормальных условиях.

Ответ: $D=8,25 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

5.189. При каком давлении p отношение вязкости некоторого газа к коэффициенту его диффузии $\eta/D=0,3$ кг/м³, а средняя квадратичная скорость его молекул $\langle v \rangle = 632$ м/с.

Ответ: $p=39,9$ кПа.

5.190. Найти среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекул гелия при давлении $p=101,3$ кПа и температуре $t=0$ °С, если вязкость гелия $\eta=13$ мкПа·с.

Ответ: $\langle \lambda \rangle = 182$ нм.

5.191. Найти вязкость η азота при нормальных условиях, если коэффициент диффузии для него $D=1,42 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Ответ: $\eta=17,8$ мкПа·с.

5.192. Найти диаметр σ молекулы кислорода, если при температуре $t=0$ °С вязкость кислорода $\eta=18,8$ мкПа·с.

Ответ: $\sigma=0,3$ нм

5.193. Найти теплопроводность K водорода, вязкость которого $\eta=8,6$ мкПа·с.

Ответ: $K=89,33$ мВт/(м·К).

5.194. Найти теплопроводность K воздуха при давлении $p=100$ кПа и температуре $t=10$ °С. Диаметр молекул воздуха $\sigma=0,3$ нм.

Ответ: $K=13,1$ мВт/(м·К).

5.195. В сосуде объемом $V=2$ л находится $N=4 \cdot 10^{22}$ молекул двухатомного газа. Теплопроводность газа $K=14$ мВт/(м·К). Найти коэффициент диффузии D газа.

Ответ: $D=2,02 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

5.196. Углекислый газ и азот находятся при одинаковых температурах и давлениях. Найти для этих газов отношение: 1) коэффициентов диффузии; 2) вязкостей; 3) теплопроводностей. Диаметры молекул газов считать одинаковыми.

Ответ: $D_1/D_2=0,8$; $\eta_1/\eta_2=1,25$; $K_1/K_2=0,96$.

5.197. Как изменятся коэффициенты диффузии D и вязкости η идеального газа, если объем газа увеличить в n раз:

а) изотермически; б) изобарически?

Ответ: а) D увеличился в n раз, η - не изменился; б) D увеличился в $n \sqrt{n}$ раз, η - в \sqrt{n} раз.

5.198. Сложены торцами два стержня, длины которых l_1, l_2 и теплопроводности χ_1, χ_2 . Найти теплопроводность однородного стержня длины $l_1 + l_2$, проводящего теплоту так же, как и система из двух этих стержней. Боковые поверхности стержней теплоизолированы.

Ответ: $\chi = (l_1 + l_2) / (l_1 / \chi_1 + l_2 / \chi_2)$.

5.199. Два куска металла, теплоемкости которых C_1 и C_2 , соединены между собой стержнем длины l с помощью поперечного сечение S и достаточно малой теплопроводностью χ . Вся система теплоизолирована от окружающего пространство. В момент $t=0$ разность температур между двумя кусками металла равна T_0 . Пренебрегая теплоемкостью стержня, найти разность температур между металлами как функцию времени.

Ответ: $\Delta T = T_0 e^{-\alpha t}$.

5.200. Два одинаковых параллельных диска, оси которых совпадают, расположены на расстоянии h друг от друга. Радиус каждого диска a , причем $a \gg h$. Один диск вращают с небольшой угловой скоростью ω , другой диск неподвижен. Найти момент сил трения, действующий на неподвижный диск, если коэффициент вязкости газа между дисками равен η .

Ответ: $N = \frac{\pi \eta \omega a^4}{2h}$

РАЗДЕЛ 6. Элементы физики твердого тела и физической электроники

Глава 1. Элементы физики твердого тела

П. 1.1 Элементы кристаллографии

6.1 Определить число узлов, приходящихся на одну элементарную ячейку в гранецентрированной решетке.

6.2 Определить постоянную a и расстояние d между соседними атомами кристалла Са (решетка гранецентрированная кубической сингонии). Плотность кристалла Са $\rho = 1,55 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

6.3. Определить число элементарных ячеек в единице объема кристалла: а) хлористого цезия (решетка объемноцентрированная кубической сингонии); б) меди (решетка гранецентрированная кубической сингонии); в) кобальта, имеющего гексагональную структуру с плотной упаковкой.

6.4. Найти плотность кристалла неона (при $T = 20\text{K}$), если известно, что его решетка гранецентрированная кубической сингонии. Постоянная решетки при той же температуре $a = 4,52 \text{ \AA}$.

6.5. Определить относительную атомную массу кристалла, если известно, что расстояние между ближайшими соседними атомами $d = 3,04 \text{ \AA}$. Решетка гранецентрированная кубической сингонии. Плотность кристалла $\rho = 0,534 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

6.6. Используя метод упаковки шаров, найти отношение параметров c и a в гексагональной решетке с плотнейшей упаковкой. Указать причины отклонения этой величины в реальном металле от вычисленного.

6.7. Определить постоянные a и c решетки кристалла магния, который представляет собой гексагональную решетку с плотнейшей упаковкой. Плотность кристалла магния $1,74 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

6.8. Вычислить постоянную a решетки бериллия, который представляет собой гексагональную структуру с плотной упаковкой. Параметр решетки $c = 3,59 \text{ \AA}$. Плотность кристалла бериллия $\rho = 1,82 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

6.9. Найти плотность кристалла He (при $T = 2\text{K}$), который представляет собой гексагональную структуру с плотной упаковкой. Постоянная решетки $a = 3,57 \text{ \AA}$.

Глава 2. Элементы физической электроники в вакууме и газе

П. 2.1 Термоэлектронная эмиссия

6.10. Отношение работ выхода электронов из платины и цезия $A_{\text{Pt}}/A_{\text{Cs}}=1,58$. Определить отношение минимальных скоростей теплового движения электронов, вылетающих из этих металлов.

6.11. Работа выхода электрона из металла $A=2,5 \text{ эВ}$. Определить скорость вылетающего из металла электрона, если он обладает энергией $W=10^{-18} \text{ Дж}$.

6.12. Термопара железо-константан, постоянная которой $\alpha=5,3 \cdot 10^{-5} \text{ В/К}$ и сопротивление $R = 15 \text{ Ом}$, замкнута на гальванометр. Один спай термопары находится в сосуде с тающим льдом, а второй поделен в среду, температура которой не известна. Определить эту температуру, если ток через гальванометр $I=0,2 \text{ мА}$, а внутреннее сопротивление гальванометра $r=150 \text{ Ом}$.

6.13. Сила тока I в цепи, состоящей из термопары с сопротивлением $R_1 = 4 \text{ Ом}$ и гальванометра с сопротивлением $R_2 = 80 \text{ Ом}$, равна 26 мкА при разности температур спаев, равной 50°C . Определить постоянную термопары α .

6.14. Определить работу выхода электронов из металла, если плотность тока насыщения двухэлектродной лампы при температуре T_1 равна J_1 , а при температуре T_2 равна J_2 .

6.15. Вывести формулу для скорости изменений плотности термоэлектронного тока насыщения с температурой.

6.16. Определить температуру, соответствующую средней кинетической энергии поступательного движения электронов, равной работе выхода из вольфрама, если поверхностный скачок потенциала для вольфрама $4,5\text{В}$.

6.17. Какой наименьшей скоростью V должны обладать свободные электроны в цезии и платине для того, чтобы они смогли покинуть металл?

6.18. Во сколько раз изменится удельная, термоэлектронная эмиссия вольфрама, находящегося при температуре $T_1 = 2400 \text{ K}$, если повысить его температуру на $\Delta T = 100 \text{ K}$?

6.19. Во сколько раз катод из торированного вольфрама при температуре $T = 1800 \text{ K}$ дает большую удельную эмиссию, чем катод из чистого вольфрама при той же температуре? Эмиссионная постоянная для чистого вольфрама $B_1 = 0,6 \cdot 10^6 \text{ A}/(\text{m}^2\text{K}^2)$, торированного вольфрама $B_2 = 0,3 \cdot 10^7 \text{ A}/(\text{m}^2\text{K}^2)$.

П. 2.2 Электропроводность слабоионизированных газов

6.20. Потенциал ионизации атома водорода $13,6 \text{ В}$. Определить температуру, при которой атомы водорода имеют среднюю кинетическую энергию поступательного движения, достаточную для ионизации.

6.21. Энергия ионизации атома водорода $E_i = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$. Определить потенциал ионизации U_i водорода.

6.22. Какой наименьшей скоростью должен обладать электрон, чтобы ионизировать атом азота, если потенциал ионизации U_i азота равен $14,5 \text{ В}$.

6.23. Какова должна быть температура T атомарного водорода, чтобы средняя кинетическая энергия поступательного движения атомов была достаточна для ионизации путем соударений? Потенциал ионизации атомарного водорода равен $13,6 \text{ В}$.

6.24. Посредине между электродами ионизационной камеры пролетела α -частица, двигаясь параллельно электродам, и образовала на своем пути цепочку ионов. Спустя какое время после пролета α -частицы, ионы дойдут до электродов, если расстояние d между электродами равно 4 см , разность потенциалов $U = 5 \text{ кВ}$ и подвижность ионов обоих знаков в среднем $b = 2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$?

6.25. Азот ионизируется рентгеновским излучением. Определить проводимость азота, если в каждом кубическом сантиметре газа находится в условиях равновесия 10^7 пар ионов. Подвижность положительных ионов $b_+ = 1,27 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, отрицательных – $b_- = 1,81 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

6.26. Воздух между плоскими электродами ионизационной камеры ионизируется рентгеновским излучением. Сила тока I , текущего через

камеру, равна 1,2 мкА. Площадь каждого электрода равна 300 см², расстояние между ними 2 см, разность потенциалов 100 В. Найти концентрацию n пар ионов между пластинами, если ток далек от насыщения. Подвижность положительных ионов $b_+ = 1,4 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ и отрицательных $b_- = 1,9 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Заряд каждого иона равен элементарному заряду.

6.27. Объем V газа, заключенного между электродами ионизационной камеры, равен 0,5 л. Газ ионизируется рентгеновским излучением. Сила тока насыщения равна 4 нА. Сколько пар ионов образуется в одну секунду в одном кубическом сантиметре газа? Заряд каждого иона равен элементарному заряду.

6.28. Найти силу тока насыщения между пластинами конденсатора, если под действием ионизатора в каждом кубическом сантиметре пространства между пластинами конденсатора каждую секунду образуется 10^8 пар ионов, каждый из которых несет один элементарный заряд. Расстояние между пластинами конденсатора равно 1 см, площадь пластины равна 100 см².

6.29. В ионизационной камере, расстояние между плоскими электродами которой равно 5 см, проходит ток насыщения плотностью 16 мкА/м². Определить число пар ионов, образующихся в каждом кубическом сантиметре пространства камеры в 1 с.

П. 2.3 Классическая теория теплоемкости. Теория теплоемкости Эйнштейна

6.30. Определить изменение внутренней энергии кристалла никеля при нагревании его от $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$. Масса m кристалла равна 20 г. Теплоемкость C вычислить.

6.31. Вывести формулу для средней энергии классического линейного гармонического осциллятора при тепловом равновесии. Вычислить значение средней энергии при $T = 300 \text{ К}$.

6.32. Определить теплоту, необходимую для нагревания кристалла NaCl, массой $m = 20 \text{ г}$ на $\Delta T = 2 \text{ К}$. Рассмотреть два случая:

- а) нагревание происходит от температуры $T_1 = \theta_D = 320 \text{ К}$;
- б) нагревание происходит от температуры $T_1 = 2 \text{ К}$.

6.33 Исходя из классической теории, вычислить удельные теплоемкости кристаллов: 1) Cu; 2) Al; 3) NaCl и 4) CaCl₂.

6.34. Вычислить изменение внутренней энергии кристалла Ni при нагревании его от $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $t_2 = 200^\circ\text{C}$. Масса кристалла 20 г.

6.35. Получить формулу для среднего значения энергии $\langle E \rangle$ линейного гармонического осциллятора при тепловом равновесии. Вычислить значение $\langle E \rangle$ при $T = 300\text{K}$.

6.36. Определить теплоемкость и энергию системы, состоящей из $N = 10^{26}$ трехмерных классических гармонических осцилляторов. Температура системы $T = 300\text{K}$.

6.37. Характеристическая температура атомов Ag равна $\theta_E = 165\text{K}$. Определить частоту колебаний атомов Ag по теории теплоемкости Эйнштейна.

6.38. Во сколько раз изменится средняя энергия квантового осциллятора, приходящаяся на одну степень свободы при повышении температуры от $T_1 = \frac{1}{2}\theta_E$ до $T_2 = \theta_E$?

6.39. Используя квантовую теорию теплоемкости Эйнштейна, вычислить изменение ΔE внутренней энергии одного килограмм-атома кристалла при нагревании его на $\Delta T = 2\text{K}$ от температуры $T_1 = \frac{1}{2}\theta_E$.

6.40. Вычислить по теории Эйнштейна нулевую энергию, которой обладает один килограмм-атом кристалла цинка. Характеристическая температура θ_E для цинка равна 230 K.

6.41. Определить: 1) среднюю энергию линейного одномерного квантового осциллятора при температуре $T = \theta_E$ ($\theta_E = 200\text{K}$); 2) энергию системы, состоящей из $N = 10^{25}$ квантовых трехмерных независимых осцилляторов, при температуре $T = \theta_E$ ($\theta_E = 300\text{K}$).

6.42. Найти частоту ν колебаний атомов серебра по теории теплоемкости Эйнштейна, если характеристическая температура θ_E серебра равна 165 K.

6.43. Во сколько раз изменится средняя энергия квантового осциллятора, приходящаяся на одну степень свободы, при повышении температуры от $T_1 = \theta_E / 2$ до $T_2 = \theta_E$? Учесть нулевую энергию.

6.44. Определить отношение $\langle \varepsilon \rangle / \langle \varepsilon_T \rangle$ средней энергии квантового осциллятора к средней энергии теплового движения молекул идеального газа при температуре $T = \theta_E$.

6.45. Используя квантовую теорию теплоемкости Эйнштейна, вычислить изменение молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его на $\Delta T = 2$ К от температуры $T = \theta_E$.

6.46. Пользуясь теорией теплоемкости Эйнштейна, определить изменение молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его от нуля до $T_1 = 0,1 \theta_E$. Характеристическую температуру θ_E Эйнштейна принять для данного кристалла равной 300 К.

6.47. Определить относительную погрешность, которая будет допущена, если при вычислении теплоемкости C вместо значения, даваемого теорией Эйнштейна (при $T = \theta_E$), воспользоваться значением, даваемым законом Дюлонга и Пти

6.48. Вычислить по теории Эйнштейна молярную нулевую энергию кристалла цинка. Характеристическая температура θ_E для цинка равна 230К.

П. 2.4 Теория теплоемкости Дебая

6.49. В теории Дебая твердое тело рассматривается как система из продольных и поперечных стоячих волн. Определить функцию распределения частот $g(\nu)$ для кристалла с трехмерной решеткой. Принять, что число собственных колебаний Z ограничено и равно $3N$, N – число атомов в рассматриваемом объеме.

6.50. Используя формулу для энергии трехмерного кристалла

$$E = 3RT \cdot 3 \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{\frac{\Theta_D}{T}} \frac{x^3 dx}{e^x - 1},$$

вывести выражение килограмм-атомной теплоемкости.

6.51. Килограмм-атомная теплоемкость трехмерного кристалла выражается формулой

$$C_\mu = 3R \left[12 \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{\frac{\Theta_D}{T}} \frac{x^3}{e^x - 1} dx - \frac{3 \left(\frac{\Theta_D}{T} \right)}{e^{\frac{\Theta_D}{T}} - 1} \right],$$

Найти предельное выражение C_v при низких температурах ($\theta_D \gg T$).

6.52. Для кристалла Au вычислить максимальную частоту собственных колебаний по теории Дебая. $\theta_D = 180$ К.

6.53. Кристалл нагревают от нуля до $T = 0,16 \theta_D$. Найти отношение изменения его внутренней энергии ΔE к величине нулевой энергии E_0 . Принять $T \ll \theta_D$.

6.54. Вычислить изменение внутренней энергии одного килограмм-атома кристалла при его нагревании на $\Delta T = 2$ К от температуры $T_1 = \frac{1}{2}\theta_D$. Использовать квантовую теорию Дебая.

6.55. Определить характеристическую температуру Дебая серебра, если для нагревания 10г от $T_1 = 10$ К до $T_2 = 20$ К было затрачено $\Delta Q = 0,71$ Дж теплоты. Принять $T \ll \theta_D$.

6.56. Найти отношение характеристических температур Эйнштейна и Дебая. Указание. Использовать выражение для нулевых энергий, вычисленных по обеим теориям.

6.57. Для кристалла с двумерной решеткой получить функцию распределения частот $g(\nu)$. Кристалл состоит из невзаимодействующих слоев, число собственных колебаний Z ограничено и равно $3N$ (N – число атомов кристалла). Рассматривать твердое тело как систему продольных и поперечных стоячих волн.

6.58. Зная функцию распределения частот (см. задачу 6.57) для кристалла с двумерной решеткой, получить формулу для энергии кристалла, содержащего N (равное N_A) атомов.

6.59. Используя ответ задачи 6.58, получить выражение для теплоемкости килограмм-атома C_v кристалла с двумерной решеткой.

6.60. Вычислить нулевую энергию одного килограмм-атома двумерного кристалла, если характеристическая температура Дебая $\theta_D = 350$ К.

6.61. Для кристалла с одномерной решеткой получить функцию распределения частот $g(\nu)$. Кристалл состоит из линейных шелей, не

взаимодействующих между собой, число собственных колебаний Z ограничено и равно $3N$ (N – число атомов кристалла).

6.62. Решить №6.58 для кристалла с одномерной решеткой.

6.63. Решить №6.59 для кристалла с одномерной решеткой.

6.64. Вычислить нулевую энергию одного килограмм-атома одномерного кристалла, если характеристическая температура Дебая $\theta_D = 300$ К.

6.65. Найти энергию фонона, соответствующего граничной частоте, если характеристическая температура $\theta_D = 250$ К.

6.66. Определить квазиимпульс фонона частотой $\nu = 0,1 \nu_{\max}$. Среднее значение скорости звука в кристалле $v = 1380$ м/с, $\theta_D = 100$ К. Дисперсией звуковых волн пренебречь.

6.67. Вычислить по теории Дебая молярную кулевою энергию кристалла меди. Характеристическая температура θ_D меди равна 320 К.

6.68. Определить максимальную частоту ω_{\max} собственных колебаний в кристалле золота по теории Дебая. Характеристическая температура θ_D равна 180 К.

6.69. Вычислить максимальную частоту ω_{\max} Дебая, если известно, что молярная теплоемкость C_m серебра при $T = 20$ К равна 1,7 Дж/(моль·К).

6.70. Найти отношение изменения внутренней энергии кристалла при нагревании его от нуля до $T = 0,1 \theta_D$ к нулевой энергии U_0 . Считать $T \ll \theta_D$.

6.71. Пользуясь теорией теплоемкости Дебая, определить изменение молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его от нуля до $T = 0,1 \theta_D$. Характеристическую температуру θ_D Дебая принять для кристалла, равной 300 К. Считать $T \ll \theta_D$.

6.72. Используя квантовую теорию Дебая, вычислить изменение молярной внутренней энергии кристалла при нагревании его на $\Delta T = 2$ К от температуры $T = \theta_D / 2$.

6.73. При нагревании серебра массой $m = 10$ г от $T_1 = 10$ К до $T_2 = 20$ К было подведено $\Delta Q = 0,71$ Дж теплоты. Определить характеристическую температуру θ_D Дебая серебра. Считать $T \ll \theta_D$.

6.74. Определить относительную погрешность, которая будет допущена при вычислении теплоемкости кристалла, если вместо значения, даваемого теорией Дебая (при $T = \theta_D$), воспользоваться значением, даваемым законом Дюлонга и Пти.

6.75. Вычислить молярную внутреннюю энергию кристаллов с двумерной решеткой, если характеристическая температура θ_D Дебая равна 350 К.

6.76. Вычислить молярную нулевую энергию кристалла с одномерной решеткой, если характеристическая температура θ_D равна 300 К.

П. 2.5. Теплоемкость кристаллов при низких и высоких температурах

6.77. Найти максимальную энергию ϵ_{\max} фонона, который может возбуждаться в кристалле, характеризуемом температурой Дебая $\theta = 300$ К. Фотон какой длины волны обладал бы такой же энергией?

6.78. Оценить максимальное значение импульса P_{\max} фонона в серебре, если известно, что скорости поперечных волн 1590 м/с, продольных 3600 м/с, число атомов в единице объема $5,86 \cdot 10^{28}$ м⁻³, температура Дебая 208 К. Фотон какой длины волны обладал бы таким же импульсом?

6.79. Атомная масса серебра $m(\text{Ag}) = 107,9$, плотность $\rho = 10,5$ г/см³. Исходя из этих данных, оценить максимальное значение импульса фонона в серебре.

6.80. Какое количество фононов максимальной частоты возбуждается в среднем при температуре $T = 400$ К в кристалле, дебаевская температура которого $\theta = 200$ К?

6.81. Приняв для серебра значение температуры Дебая $\theta = 208$ К, определить: 1) максимальное значение энергии фонона; 2) среднее число фононов с энергией ϵ_{\max} при температуре $T = 300$ К.

6.82. Приняв для бериллия значение температуры Дебая 1420 К, определить: 1) максимальное значение энергии фонона; 2) среднее число фононов с энергией ϵ_{\max} при температуре 1500 К.

6.83. Определить в электрон-вольтах максимальную энергию фонона, который может возбуждаться в кристалле NaCl, характеризуемом температурой Дебая 320 К. Фотон какой длины волны обладал бы такой энергией?

6.84. Определить в электрон-вольтах максимальную энергию фонона, который может возбуждаться в кристалле золота, если характеристическая температура Дебая для него 180 К. Какова была бы длина волны фотона, обладающего такой энергией? Считать $T \ll \theta_D$.

6.85. Определить максимальную частоту упругих колебаний атомов кристаллической решетки свинца, если характеристическая температура равна 90 К. В каком диапазоне электромагнитных колебаний лежит эта частота?

6.86. Найти характеристическую температуру для железа, если максимальная частота упругих колебаний атомов в кристаллической решетке $\nu_{\max} = 8,75 \cdot 10^{12}$ Гц.

6.87. Вычислить усредненное значение скорости звука в кристалле серебра. Модули упругости E и G , а также плотность ρ серебра считать известными.

6.88. Определить длину волны фононов в кристалле вольфрама, соответствующих частоте $\nu = 0,1 \nu_{\max}$, если $\theta_D = 310$ К. Дисперсией звуковых волн пренебречь.

6.89. Определить скорость звука в кристалле, характеристическая температура которого $\theta_D = 300$ К, а межатомное расстояние $a = 2,5$ Å.

6.90. Вычислить среднюю длину свободного пробега λ фононов в кварце (SiO_2) при некоторой температуре, если при той же температуре $\alpha = 13$ Вт/(м·град), теплоемкость $C = 44$ кДж/(м·град), усредненное значение скорости звука $v = 5 \cdot 10^3$ м/с. Плотность кварца $\rho = 2,65 \cdot 10^3$ кг/м³.

6.91. Вычислить давление фононного газа в свинце при абсолютном нуле, $\theta_D = 85$ К.

6.92. Определить фононное давление в меди при $T = \theta_D = 320$ К.

6.93. Найти коэффициент объемного расширения для анизотропного кристалла, коэффициенты расширения которого по трем взаимно

перпендикулярным направлениям составляют $\alpha_1 = 1,25 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$, $\alpha_2 = 1,1 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$, $\alpha_3 = 1,15 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$.

6.94. Известно, что температура тела в течение 20 мин падает от 100 °С до 60 °С. Температура воздуха при этом равна 20 °С. Через сколько времени (от момента начала охлаждения) температура тела понизится до 25 °С? Считать, что скорость охлаждения тела в воздухе пропорциональна разности между температурами тела и воздуха.

6.95. Стена (коэффициент теплопроводности $k = 0,0015$) имеет 30 см толщины. Найти, как зависит температура от расстояния от внешней поверхности стены, если температура равна 20° С на внутренней и 0°С на внешней поверхности.

6.96. Концы однородного стержня постоянного сечения поддерживаются при температурах t_1 и t_2 ($t_2 > t_1$). Температурный коэффициент линейного расширения материала стержня равен α . Чему равна длина стержня, если при 0°С она была l_0 ?

6.97. Трубопровод тепловой магистрали (диаметр 20 см) защищен изоляцией толщиной 10 см; величина коэффициента теплопроводности $k = 0,00017$. Температура трубы 160 °С; температура внешнего покрова 30°С. Найти распределение температуры внутри изоляции, а также количество тепла, отдаваемое 1 погонным метром трубы.

П. 2.6. Электропроводность металлов. Распределение Ферми-Дирака

6.98. Зная распределение $dn(v)$ электронов в металле по скоростям, выразить $\langle 1/v \rangle$ через максимальную скорость v_{\max} электронов в металле, находящемся при $T = 0$ К.

6.99. Выразить среднюю квадратичную скорость электронов в металле при температуре $T=0$ К через максимальную скорость v_{\max} электронов. Функцию распределения электронов по скоростям считать известной.

6.100. Металл находится при температуре $T = 0$ К. Определить, во сколько раз число электронов со скоростями от $(v_{\max} / 2)$ до v_{\max} больше числа электронов со скоростями от 0 до $(v_{\max} / 2)$.

6.101. Выразить среднюю скорость $\langle v \rangle$ электронов в металле при $T = 0$ К через максимальную скорость v_{\max} . Вычислить $\langle v \rangle$ для металла, уровень Ферми ϵ_f которого при $T = 0$ К равен 6 эВ.

6.102. Определить максимальную скорость v_{\max} электронов в металле При $T = 0$ К, если уровень Ферми $\varepsilon_f = 5$ эВ.

6.103. Определить отношение концентрации n_{\max} электронов в металле (при $T = 0$ К), энергия которых отличается от максимальной не более чем на $\Delta\varepsilon$ к концентрации n_{\min} электронов, энергии которых не превышают значения $\varepsilon = \Delta\varepsilon$; $\Delta\varepsilon$ принять равным $0,01 \varepsilon_f$.

6.104. Оценить температуру $T_{\text{кр}}$ вырождения для калия, если принять, что на каждый атом приходится по одному свободному электрону. Плотность ρ калия 860 кг/м^3 .

6.105. Электроны в металле находятся при температуре $T = 0$ К. Найти относительное число $\Delta N/N$ свободных электронов, кинетическая энергия которых отличается от энергии Ферми не более чем на 2 %.

6.106. Во сколько раз число свободных электронов, приходящихся на один атом металла при $T = 0$ К, больше в алюминии, чем в меди, если уровни Ферми соответственно равны $\varepsilon_{f1} = 11,7$ эВ, $\varepsilon_{f2} = 7,0$ эВ?

6.107. Определить число свободных электронов, которое приходится на один атом натрия при температуре $T = 0$ К. Уровень Ферми ε_f для натрия $3,12$ эВ, плотность натрия равна 970 кг/м^3 .

6.108. По однородному цилиндрическому проводу радиусом R без изоляции течет ток силой I . Определить стационарное распределение температуры в проводе, если температура его поверхности (T_0) поддерживается постоянной. Удельное сопротивление проводника ρ .

6.109. Какова работа выхода из металла, если повышение температуры нити накала, сделанной из этого металла, от 2000 К до 2001 К увеличивает ток насыщения в электронной лампе на 1 %?

6.110. Определить ток насыщения в электронной лампе с вольфрамовым катодом при следующих условиях: длина и диаметр нити 3 см и $0,1$ мм; температура накала 2700 К; постоянная для вольфрама равна $60,2 \text{ А} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$.

6.111. Германий имеет при некоторой температуре удельное сопротивление $\rho = 0,48 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Определить концентрацию носителей тока n , если подвижности электронов $u_n = 0,36 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а дырок $u_p = 0,16 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

6.112. Определить подвижность и концентрацию дырок в полупроводнике p-типа, если его удельная проводимость $\sigma = 112 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а постоянная Холла $R_H = 3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$.

6.113. Определить уровень Ферми в полупроводнике, если энергия активации $\Delta E_0 = 1 \text{ эВ}$. За нулевой уровень отсчета кинетической энергии электронов принять низший уровень зоны проводимости.

6.114 В германии часть атомов замещена атомами сурьмы. Диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon = 16$. Рассматривая дополнительный электрон примесного атома по модели Бора, вычислить его энергию E связи и радиус r его орбиты.

6.115. Пластина шириной $b = 1 \text{ см}$ и длиной $L = 10 \text{ см}$ изготовлена из полупроводника и помещена в однородное магнитное поле с $B = 0,2 \text{ Тл}$, перпендикулярное плоскости пластины. К концам пластины по направлению L приложено постоянное напряжение $U = 300 \text{ В}$. Определить разность потенциалов U_x на гранях пластины, если $R_H = 0,1 \text{ м}^3/\text{Кл}$, удельное сопротивление $\rho = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

6.116. Кремниевая пластина шириной $b = 2 \text{ см}$ помещена в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$ перпендикулярно линиям магнитной индукции. Холловская разность потенциалов $U_x = 0,368 \text{ В}$ возникает на гранях пластины при протекании тока с плотностью $j = 0,5 \text{ А/мм}^2$ вдоль пластины. Определить концентрацию носителей тока.

6.117. При нагревании кремниевого кристалла от температуры $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ его удельная проводимость возрастает в 2,28 раза. По приведенным данным определить ширину ΔE запрещенной зоны кристалла кремния.

6.118. Германиевый кристалл, ширина ΔE запрещенной зоны в котором равна $0,72 \text{ эВ}$, нагревают от температуры $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Во сколько раз возрастает его удельная проводимость?

6.119. p-n-переход находится под обратным напряжением $U = 0,1 \text{ В}$. Его сопротивление $R_1 = 692 \text{ Ом}$. Каково сопротивление R_2 перехода при прямом напряжении?

6.120. Металлы литий и цинк приводят в соприкосновение друг с другом при температуре $T = 0 \text{ К}$. На сколько изменится концентрация

электронов проводимости в цинке? Какой из этих металлов будет иметь более высокий потенциал?

6.121. Сопротивление R_1 p-n-перехода, находящегося под прямым напряжением $U = 1$ В, равно 10 Ом. Определить сопротивление R_2 перехода при обратном напряжении.

6.122. Найти минимальную энергию W_{\min} , необходимую для образования пары электрон-дырка в кристалле CaAs, если его удельная проводимость γ изменяется в 10 раз при изменении температуры от 20 до 3 °С.

6.123. Сопротивление R_1 кристалла PbS при температуре $t_1 = 20$ °С равно 104 Ом. Определить его сопротивление R_2 при температуре $t_2 = 80$ °С.

6.124. Каково значение энергии Ферми ε_F у электронов проводимости двухвалентной меди? Выразить энергию Ферми в джоулях и электрон-вольтах.

6.125. Прямое напряжение U , приложенное к p-n-переходу, равно 2 В. Во сколько раз возрастет сила тока через переход, если изменить температуру $T_1 = 300$ К до $T_2 = 273$ К?

5 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1989-2001.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. – М.: 1990-2002. – Т.1 – 5.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1977-2003. – Т.1 – 3.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1990-2000. – 480с.
5. Иродов И.Е. Основные законы механики.- М.: Высшая школа, 1985-2002. – 250 с.
6. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высшая школа, 1983-2002. –280 с.
7. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1979-2001.
8. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике. – М.: Наука, 1982-2003.
9. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики/ Т.И. Трофимова, Е.Г. Павлова– М.: Высшая школа, 1999. – 591 с.

Дополнительная.

1. Берклеевский курс физики/ Ч. Киттель, У. Найт, М. Рудерман, Э. Парселл, Ф. Крауфорд, Э. Вихман, Ф. Рейф. – М.: Наука, 1971-1974. – Т. I-У.
2. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике./ Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир, 1965-1967. – Вып. 1-9.
3. Матвеев А.Н. Курс общей физики. – М.: Высшая школа, 1976-1989. – Т. I-У.
4. Астахов А.В. Курс физики/ А.В. Астахов, Ю.М. Широков – М.: Наука, 1977-1981. – Т. 1-3.
5. Алешкевич В.А. Механика сплошных сред (университетский курс общей физики)/ В.А. Алешкевич, Л.Г. Деденко, В.А. Караваев. – М.: Изд-во физического факультета МГУ, 1999.
6. Орир Д. Физика.- М.: Мир, 1981, – Т.1-2.
7. Ахманов С.А. Физическая оптика/ С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин – М.: Изд-во МГУ, 1998.
8. Ахиезер А.И. Курс общей физики/ А.И. Ахиезер, Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1969.
9. Кристи Р. Строение вещества: введение в современную физику/ Р. Кристи, А. Питти – М.: Наука, 1969.
10. Мешков И.Н. Электромагнитное поле/ И.Н. Мешков, Б.В. Чириков – Новосибирск.: Наука, 1985, – Т.1-11.

11. Тарасов Л.В. Основы квантовой механики. – М.: Высшая школа, 1978.
12. Тарасов Л.В. Введение в квантовую оптику. – М.: Высшая школа, 1987.
13. Суханов А.Д. Лекции по квантовой физике. – М.: Высшая школа, 1991.
14. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978.
15. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1977.
16. Готтфрид К. Концепция физики элементарных частиц/ К. Готтфрид, В. Вайскопф – М., Мир, 1988.
17. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. – М.: Наука, 1987.
18. Козел С.М. Сборник задач по физике/ С.М. Козел, Э.И. Рашба, С.А. Славатинский. – М.: Наука, 1987.

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ОБЩЕМУ КУРСУ ФИЗИКИ

РАЗДЕЛ 5. **Статистическая физика и термодинамика**
РАЗДЕЛ 6. **Элементы физики твердого тела**
 и физической электроники

Составители: А. И. Гаврилов, И. В. Двадненко, Л. Е. Изотова; Е. С. Киселева, В. В. Кривченко, А. В. Лаврентьев, Т. А. Лактионова, В. М. Лекарев, А. С. Магомадов, А. Ф. Маштаков, Р. Г. Мальцев, В. Г. Миненко, Ф. В. Москаленко, П. А. Осюшкин, Г. П. Падалкина, М. Л. Романова, Б. В. Ромашко, Е. В. Рыкова, Е. В. Сердюк, М. И. Сомова, Е. Ю. Стригин, Р. В. Терюха, А. А. Федоров, В. Г. Чередниченко, Т. Л. Шапошникова.

Редакторы
Компьютерная верстка

А. В. Снагощенко, Т. П. Горшкова
Р. Г. Мальцев

Подписано в печать
Бумага «Снегурочка»
Печ.л. 4,0
Усл.печ.л. 3,8
Уч.-изд.л. 3,42

Формат 60x84/16
Печать трафаретная
Изд. № 105
Тираж 100 экз.
Заказ № 75

Цена договорная

Издание КубГТУ: 350072, Краснодар, ул. Московская 2, корп. А.

Отпечатано в ООО «Издательский Дом – Юг»,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, корп. «В», оф. В-120
тел. 8-918-41-50-571

