Министерство образования Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кужир П.Г., Самойлюкович В.А., Тесевич Б.И.

ФИЗИКА

Часть 1: Механика, статистическая физика и термодинамика.
Контрольные задания и учебные материалы

Учебно-методическое пособие для студентов-заочников
строительного и горно-механического профилей

Рекомендовано редакционно-издательским советом БНТУ

Минск
"Технопринт"
2002

УДК 530.1(075.8)
ББК 22.3я7
К 88

Рецензенты:

Доктор физ.-мат. наук, профессор И.Р. Гулаков,
кандидат физ.-мат. наук, профессор И.А. Сатиков.

Учебно-методическое пособие содержит учебные материалы и контрольные задания по механике, статистической физике и термодинамике. Приведена рабочая программа по соответствующим разделам физики, сформулированы методические требования, предъявляемые к выполнению и оформлению контрольных работ.

ISBN 985-464-329-8.

Рекомендовано редакционно-издательским советом БНТУ.

ISBN 985-464-329-8.

Предисловие

Данное учебно-методическое пособие ставит своей целью оказать помощь студентам-заочникам строительных и горно-механических специальностей в изучении физики. Знание законов физики предполагает не только умение формулировать законы, но и применять их при решении задач. Как правило, решение задач вызывает наибольшие затруднения у студентов-заочников. В соответствии с этим мы представили учебный материал таким образом, чтобы студенты самостоятельно смогли решать задачи своего варианта.

В начале каждого раздела помещен краткий перечень формул и законов, необходимых при решении задач данного раздела.

Далее нами даны методические указания к решению задач, приведены примеры решения типовых задач. Затем дан набор задач для самостоятельного решения, состоящий из десяти вариантов. Задачи подобраны таким образом, чтобы уяснить понимание физических законов и развить у студента-заочника умение рассуждать.

Предполагается, что, работая с данным учебным пособием, студент-заочник будет привлекать литературу по курсу общей физики, перечень которой указан в конце рабочей программы.

В учебно-методическом пособии учтены особенности учебных планов по физике для студентов различных специальностей. Для этого даны две таблицы вариантов контрольных работ. Таблица №1 предназначена для студентов, выполняющих одну контрольную работу по механике, статистической физике и термодинамике. Таблицы №2 и №3 предназначены для студентов, учебным планом которых предусмотрены две контрольные работы.

Рабочая программа курса физики для специальностей строительного и горно-механического профилей. Часть 1

Введение

Физика как наука. Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Математика и физика. Физика и естествознание. Философия и физика. Важнейшие этапы истории физики. Роль физики в развитии техники и влияние техники на развитие физики. Компьютеры в современной физике. Роль физики в становлении инженера. Роль измерения в физике. Единицы измерения и системы единиц. Основные единицы СИ.

1. *Физические основы механики*

Предмет механики. Классическая и квантовая механика. Нерелятивистская и релятивистская механика. Кинематика, динамика и статика. Основные физические модели: материальная точка, система материальных точек, абсолютно твердое тело, сплошная среда. Границы применимости классического способа описания движения.

Элементы кинематики

Пространственно-временные отношения. Система отсчета. Скалярные и векторные физические величины.

Основные кинематические характеристики движения частиц. Скорость и ускорение. Кинематика вращательного движения твердого тела. Угловая скорость и угловое ускорение.

Элементы динамики материальной точки

Основная задача динамики. Первый закон Ньютона. Понятие инерциальной системы отсчета. Масса, сила и импульс.

Второй закон Ньютона как уравнение движения. Третий закон Ньютона.

Силы трения. Упругие силы. Сила тяжести и вес.

Законы сохранения в механике

Закон сохранения импульса. Центр инерции. Закон движения центра инерции.

Момент импульса. Момент силы. Уравнение моментов. Закон сохранения момента импульса.

Движение в центральном поле.

Работа и мощность. Коэффициент полезного действия (к.п.д.).

Кинетическая энергия. Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия и энергия взаимодействия. Закон сохранения полной механической энергии.

Элементы динамики твердого тела

Момент импульса и момент инерции твердого тела относительно неподвижной оси.

Главные оси и главные моменты инерции твердого тела.

Моменты инерции некоторых тел правильной формы.

Теорема Штейнера.

Вращательный момент. Уравнение движения твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси.

Закон сохранения момента импульса твердого тела. Кинетическая энергия вращения твердого тела. Работа и мощность при вращении твердого тела.

Гармонические колебания

Движение системы вблизи устойчивого положения равновесия. Модель гармонического осциллятора.

Примеры гармонических осцилляторов: груз на пружине, математический маятник, физический маятник, крутильный маятник.

Свободные незатухающие колебания. Параметры гармонических колебаний: амплитуда, круговая частота, фаза гармонических колебаний. Энергия гармонического осциллятора.

Свободные затухающие колебания. Коэффициент затухания, логарифмический декремент, добротность.

Вынужденные колебания осциллятора под действием синусоидальной силы. Амплитуда и фаза при вынужденных колебаниях. Резонансные кривые. Процесс установления колебаний.

Принцип суперпозиции. Сложение гармонических колебаний. Векторные диаграммы. Биения. Фигуры Лиссажу.

Волновые процессы

Волновое движение. Плоская бегущая волна. Длина волны, волновой вектор. Волновое уравнение.

Фазовая скорость и дисперсия волн. Волновой пакет. Групповая скорость.

Упругие волны в газах, жидкостях и твердых телах.

Энергетические характеристики упругих волн. Вектор Умова.

Сферические волны.

Интерференция волн. Образование стоячих волн. Уравнение стоячей волны и его анализ.

Природа звуковых волн.

Эффект Доплера.

Ультразвук. Элементы ультразвуковых технологий.

Элементы механики сплошных сред

Общие свойства жидкостей и газов. Кинематическое описание движения жидкости.

Уравнения равновесия и движения жидкости.

Идеальная жидкость. Стационарное течение идеальной жидкости. Уравнение Бернулли.

Вязкая жидкость. Силы внутреннего трения. Стационарное течение вязкой жидкости. Коэффициент вязкости.

Течение по трубе. Формула Пуазейля. Формула Стокса.

Гидродинамическая неустойчивость. Понятие о турбулентности.

Идеально упругое тело. Упругие деформации и напряжения. Закон Гука. Пластические деформации. Предел прочности.

Элементы релятивистской механики

Инерциальные системы отсчета и принцип относительности в классической механике. Преобразование Галилея.

Принцип относительности в релятивистской механике. Постулаты специальной теории относительности.

Преобразования Лоренца. Следствия из преобразований Лоренца: относительность одновременности, релятивистские изменения интервала времени и интервала длины.

Пространственно-временной интервал.

Релятивистский закон сложения скоростей.

Релятивистский импульс. Полная энергия частицы.

Взаимосвязь массы и энергии.

Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции.

Понятие об общей теории относительности.

2. Статистическая физика и термодинамика

Динамические и статистические закономерности в физике. Статистический и термодинамический методы. Макроскопическое состояние. Макроскопические параметры как средние значения. Тепловое равновесие. Равновесный процесс. Уравнение состояния.

Элементы молекулярно-кинетической теории и статистической физики

Модель идеального газа. Уравнение состояния идеального газа.

Смесь идеальных газов. Закон Дальтона.

Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

Молекулярно-кинетический смысл температуры.

Число степеней свободы молекулы. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул.

Внутренняя энергия идеального газа.

Микроскопические параметры. Вероятность и флуктуации.

Статистическое распределение Максвелла для молекул газа по скоростям и энергиям их хаотического движения.

Характерные скорости теплового движения молекул газа.

Барометрическая формула.

Распределение Больцмана для молекул идеального газа, находящихся во внешнем потенциальном поле.

Энтропия и вероятность. Определение энтропии равновесной системы через статистический вес макросостояния.

Статистическое описание квантовой системы. Неразличимость одинаковых частиц в квантовой механике. Квантовые идеальные газы.

Понятие о физической кинетике. Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул. Время релаксации.

Явления переноса в термодинамически неравновесных системах.

Опытные законы теплопроводности, диффузии и внутреннего трения.

Молекулярно-кинетическая теория этих явлений.

Вывод уравнения диффузии, теплопроводности и внутреннего трения.

Основы термодинамики

Количество теплоты. Теплоемкость.

Работа газа при изменении его объема.

Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамике к изопроцессам и адиабатическому процессу идеального газа.

Политропические процессы.

Зависимость теплоемкости идеального газа от вида процесса.

Классическая молекулярно-кинетическая теория теплоемкости идеальных газов и ее ограниченность.

Границы применимости закона равнораспределения энергии и понятие о квантовании энергии вращения и колебаний молекул.

Обратимые и необратимые тепловые процессы. Круговой процесс (цикл).

Тепловые двигатели и холодильные машины.

Цикл Карно. Максимальный к.п.д. тепловой машины. Метод циклов.

Энтропия и второе начало термодинамики.

Термодинамические потенциалы и условия равновесия.

Третье начало термодинамики (теорема Нернста).

Термодинамика неравновесных процессов. Макросистемы вдали от равновесия.

Реальные газы

Отступления от законов идеальных газов. Реальные газы. Силы и потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия. Эффективный диаметр молекул.

Уравнение Ван-дер-Ваальса. Сравнение изотерм Ван-дер-Ваальса с экспериментальными изотермами.

Критическое состояние и параметры критического состояния.

Метастабильные состояния. Давление насыщенного пара.

Внутренняя энергия реального газа.

Жидкое состояние

Строение жидкостей. Поверхностное натяжение. Давление под изогнутой поверхностью жидкости.

Явления на границе твердого тела и жидкости. Капиллярные явления.

Кристаллическое состояние

Строение кристаллов. Классификация кристаллов. Типы кристаллических решеток.

Экспериментальные методы исследование кристаллов.

Точечные дефекты в кристаллах: вакансии, примеси внедрения, примеси замещения.

Краевые и винтовые дислокации. Дислокация и пластичность.

Механические свойства кристаллов.

Теплоемкость кристаллов при низких и высоких температурах.

Фазовые равновесия и фазовые превращения

Фазы и условия равновесия фаз. Фазовые превращения. Фазовые переходы первого рода.

Фазовые диаграммы. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса и диаграмма равновесных давлений и температур для двухфазных систем. Критическая точка.

Трехфазная система "твердое тело - жидкость - газ".

Обобщенная диаграмма состояния. Тройная точка.

Сверхтекучесть жидкого гелия.

Фазовые переходы второго рода.

Методические указания по выполнению контрольных работ

По курсу физики студент-заочник должен выполнить контрольные работы, количество которых определено учебным планом специальности. При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие правила:

1. Номера задач, которые студент должен включить в свою контрольную работу, следует определить по таблице вариантов.
2. На титульном листе необходимо указать номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилию и инициалы студента, шифр и домашний адрес.
3. Контрольную работу следует выполнять аккуратно, оставляя поля для замечаний рецензента.
4. Задачу своего варианта переписывать полностью, а заданные физические величины выписывать отдельно; при этом все численные величины должны быть представлены в одной системе величин (СИ).
5. Для пояснения решения задачи, где это нужно, сделать чертеж.
6. Решение задач и выбор, используемых при этом формул следует сопровождать пояснениями.
7. В пояснениях к задаче необходимо указывать основные законы и формулы, на использовании которых базируется решение данной задачи.
8. При получении расчетной формулы, которая нужна для решения конкретной задачи, приводить ее вывод.
9. Решение задачи рекомендуется сначала сделать в общем виде, т.е. только в буквенных обозначениях, поясняя применяемые при написании формул буквенные обозначения.
10. Вычисления следует проводить путем подстановки заданных числовых значений в расчетную формулу.

11. Проверить единицы полученных величин по расчетной формуле, тем самым подтвердив ее правильность.

12. В контрольной работе следует указывать учебники и учебные пособия, которые использовались при решении задач.

13. Результаты расчета следует округлять.

Правила округления следующие:

– при сложении и вычитании все слагаемые округляют так, чтобы они не имели значащих цифр в тех разрядах, которые отсутствуют хотя бы в одном из слагаемых;

– при умножении и делении исходные данные и результат округляют до такого числа значащих цифр, сколько их содержится в наименее точном числе;

– при возведении в степень в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их содержится в числе, возводимом в степень;

– при извлечении корня в окончательном результате количество значащих цифр должно быть таким, как в подкоренном выражении;

– в промежуточных вычислениях следует сохранять на одну цифру больше, чем рекомендуют правила, приведенные выше.

Значащими цифрами называют все цифры, кроме нуля, и ноль, если он стоит в середине числа или является представителем сохраненного десятичного разряда.

Контрольные работы, представленные без соблюдения указанных правил, а также работы, не относящиеся к требуемому варианту, засчитываться не будут.

При отсылке работы на повторное рецензирование обязательно представлять работу с первой рецензией.

Таблица № 1. Варианты контрольной работы для специальностей, учебными планами которых предусмотрена по физике одна работа в семестре

Варианты	*Номера задач*								
1	101	131	141	151	171	231	241	251	271
2	102	132	142	152	172	232	242	252	272
3	103	133	143	153	173	233	243	253	273
4	104	134	144	154	174	234	244	254	274
5	105	135	145	155	175	235	245	255	275
6	106	136	146	156	176	236	246	256	276
7	107	137	147	157	177	237	247	257	277
8	108	138	148	158	178	238	248	258	278
9	109	139	149	159	179	239	249	259	279
0	110	140	150	160	180	240	250	260	280

Таблица № 2. Варианты контрольной работы № 1 для специальностей, учебными планами которых предусмотрены по физике две работы в семестре

Варианты	*Номера задач*							
1	101	111	121	131	141	151	161	171
2	102	112	122	132	142	152	162	172
3	103	113	123	133	143	153	163	173
4	104	114	124	134	144	154	164	174
5	105	115	125	135	145	155	165	175
6	106	116	126	136	146	156	166	176
7	107	117	127	137	147	157	167	177
8	108	118	128	138	148	158	168	178
9	109	119	129	139	149	159	169	179
0	110	120	130	140	150	160	170	180

Таблица № 3. Варианты контрольной работы № 2 для специальностей, учебными планами которых предусмотрены по физике две работы в семестре

Варианты	*Номера задач*							
1	201	211	221	231	241	251	261	271
2	202	212	222	232	242	252	262	272
3	203	213	223	233	243	253	263	273
4	204	214	224	234	244	254	264	274
5	205	215	225	235	245	255	265	275
6	206	216	226	236	246	256	266	276
7	207	217	227	237	247	257	267	277
8	208	218	228	238	248	258	268	278
9	209	219	229	239	249	259	269	279
0	210	220	230	240	250	260	270	280

Физические основы механики

Основные определения и формулы

Положение материальной точки в пространстве определяется радиус-вектором $\vec{r}$, т.е. вектором, проведенным из начала координат в данную точку пространства.

Перемещение ($\Delta\vec{r}$) точки есть вектор, проведенный из ее начального положения в конечное и равный приращению радиус-вектора данной точки.

Скорость материальной точки есть производная от радиус-вектора движущейся точки по времени:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Ускорение точки есть производная от скорости по времени или вторая производная от радиус-вектора движущейся точки по времени:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}.$$

В равномерном прямолинейном движении ($\vec{v} = \text{const}$) выполняется соотношение

$$\Delta\vec{r} = \vec{v}\,\Delta t.$$

Формулы движения с постоянным ускорением ($\vec{a} = \text{const}$):

$$\vec{v} = \vec{v}_o + \vec{a}t,$$

$$\Delta\vec{r} = \vec{v}_o t + \frac{\vec{a}t^2}{2},$$

где $\vec{v}_o$ – начальная скорость.

В криволинейном движении точки полное ускорение $\vec{a}$ есть векторная сумма тангенциального $\vec{a}_\tau$ и нормального $\vec{a}_n$ ускорений. Модуль полного ускорения равен

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2};$$

при этом

$$a_\tau = \frac{dv}{dt},$$

$$a_n = \frac{v^2}{R},$$

где R – радиус кривизны траектории в данной точке.

Среднее значение модуля скорости и ускорения точки в промежутке времени от t до t + Δt равно

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta S}{\Delta t}, \qquad \langle a \rangle = \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

где ΔS – путь, пройденный точкой за промежуток времени Δt, а Δv – изменение скорости за то же время.

Угловая скорость тела есть производная от угла поворота по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Угловое ускорение тела есть производная от угловой скорости по времени или вторая производная от угла поворота по времени:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}.$$

В равномерном вращательном движении (ω=const) выполняется соотношение

$$\varphi = \omega t.$$

Формулы равнопеременного вращательного движения тела вокруг неподвижной оси (ε=const):

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t,$$

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}.$$

Связь угловых величин с линейными:

$$S = \varphi R, \quad v = \omega R, \quad a_\tau = \varepsilon R, \quad a_n = \omega^2 R,$$

где S – путь, пройденный точкой вращающегося тела (длина дуги), R – расстояние от точки вращения до оси (радиус дуги).

Угловая скорость тела, вращающегося равномерно, связана с числом оборотов в секунду n (частотой) и периодом вращения T соотношением:

$$\omega = 2\pi n = \frac{2\pi}{T}.$$

Первый закон Ньютона: всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние.

Импульс материальной точки есть векторная величина:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Импульс системы материальных точек равен векторной сумме импульсов всех частиц, образующих систему:

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i = \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{v}_i.$$

Второй закон Ньютона: ускорение материальной точки прямо пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Если на материальную точку одновременно действует несколько сил, то

$$\vec{a} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\vec{F}_i}{m} = \sum_{i=1}^{n} \vec{a}_i.$$

Второй закон Ньютона можно сформулировать и таким образом: скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на нее силе.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}.$$

Силы, рассматриваемые в механике:

а) сила упругости

$$F = -kx,$$

где k – коэффициент упругости (в случае пружины – жесткость); x – абсолютная деформация;

б) сила тяжести

$$P = mg;$$

в) сила гравитационного взаимодействия

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где G – гравитационная постоянная; m_1 и m_2 – массы взаимодействующих тел; r – расстояние между телами (тела рассматриваются как материальные точки);

г) сила трения (скольжения)

$$F = f \cdot N,$$

где f – коэффициент трения; N – сила нормального давления.

Жесткость системы, состоящей из двух пружин с жесткостями k_1 и k_2:

1) при параллельном соединении

$$k = k_1 + k_2,$$

2) при последовательном соединении

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}.$$

Систему взаимодействующих тел называют замкнутой, если на нее извне не действуют другие тела. Для такой системы выполняется закон сохранения импульса: импульс замкнутой системы есть величина постоянная, т.е.

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i = \text{const}.$$

Для двух тел закон сохранения импульса имеет вид:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2,$$

где $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ – скорости тел в начальный момент времени, $\vec{u}_1$ и $\vec{u}_2$ – скорости тех же тел в конечный момент времени.

Работа, совершаемая силой $\vec{F}$ при элементарном перемещении $\Delta\vec{r}$ равна,

$$\Delta A = \vec{F}\,\Delta\vec{r} = F\,\Delta S\cdot\cos\alpha,$$

где $\Delta S = |\Delta\vec{r}\,|$ – элементарный путь, α – угол между векторами $\vec{F}$ и $\Delta\vec{r}$.

Работа переменной силы F на пути S из точки 1 в точку 2 равна

$$A = \int_1^2 F\cdot\cos\alpha\, dS.$$

Изменение полной энергии системы равно работе, совершенной внешними силами, приложенными к системе:

$$W_2 - W_1 = A_{внеш}.$$

Кинетическая энергия тела, движущегося поступательно со скоростью v,

$$W_к = \frac{mv^2}{2} \quad \text{или} \quad W_к = \frac{p^2}{2m}.$$

Работа A, совершаемая результирующей силой, определяется как мера изменения кинетической энергии материальной точки.

$$A = W_{к_2} - W_{к_1}.$$

Силы, действующие на материальную точку или тело, называются консервативными, если работа этих сил при перемещении точки (тела) зависит только от начального и конечного положений точки (тела) в пространстве и не зависит от того, по какой траектории это перемещение произошло.

Если на систему материальных точек действуют консервативные силы, то вводят понятие потенциальной энергии. Работа A_{12}, совершаемая консервативными силами, полностью определяется начальной и конечной конфигурацией системы.

$$A_{12} = W_{п_1} - W_{п_2},$$

где $W_{п_i}$ – потенциальная энергия системы в начальном (1) и конечном (2) положении системы.

Потенциальная энергия:

а) упругодеформированной пружины

$$W_п^{упр} = \frac{1}{2}kx^2,$$

где k – жесткость пружины; x – абсолютная деформация;

б) гравитационного взаимодействия

$$W_п = -\frac{G\, m_1 m_2}{r},$$

где G – гравитационная постоянная; m_1 и m_2 – массы взаимодействующих тел; r – расстояние между ними (тела рассматриваются как материальные точки);

в) тела, находящегося в однородном поле силы тяжести

$$W_п = m\, g\, h,$$

где g – ускорение свободного падения; h – высота тела над уровнем, условно принятым за нулевой (формула справедлива при условии $h \ll R$, где R – радиус Земли).

Закон сохранения механической энергии: полная механическая энергия консервативной системы не изменяется с течением времени, т.е.

$$W = W_п + W_к = \text{const}.$$

Консервативной системой называют систему, в которой действуют только консервативные силы.

Закон сохранения механической энергии, в частности, справедлив для замкнутой системы, т.е. системы, на которую внешние силы не действуют, а все внутренние силы являются консервативными.

Момент $\vec{M}$ силы $\vec{F}$ относительно центра вращения

$$\vec{M} = \left[\vec{r}, \vec{F}\right],$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из центра вращения в точку приложения силы.

Момент импульса материальной точки относительно центра вращения

$$\vec{L} = [\vec{r}, m\vec{v}],$$

где $m\vec{v}$ – импульс этой точки, $\vec{r}$ – ее радиус-вектор.

Момент инерции материальной точки относительно оси вращения

$$I = mr^2,$$

где m – масса точки, r – расстояние ее от оси вращения.

Момент инерции твердого тела равен сумме моментов инерции материальных точек, составляющих это тело:

$$I = \sum_{i=1}^{n} r_i^2 \Delta m_i .$$

Моменты инерции некоторых однородных тел вращения относительно их геометрических осей вращения:

– тонкостенный цилиндр $I = mr^2$,

– сплошной цилиндр $I = \frac{mr^2}{2}$,

– шар $I = \frac{2mr^2}{5}$.

Момент инерции однородного тонкого стержня длиной ℓ относительно оси, проходящей через середину стержня перпендикулярно его длине

$$I = \frac{m\ell^2}{12}.$$

Момент инерции I тела относительно любой оси вращения и момент инерции I_0 тела относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр инерции тела, связаны соотношением (теорема Штейнера)

$$I = I_0 + md^2,$$

где m – масса тела, d – расстояние между осями.

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно точки вращения:

$$\sum_i \vec{M}_i = I\vec{\varepsilon},$$

где $\sum_i \vec{M}_i$ – результирующий момент всех внешних сил, приложенных к телу, $\vec{\varepsilon}$ – его угловое ускорение.

Основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной оси Z

$$M_z = I_z\varepsilon,$$

где M_z – результирующий момент внешних сил относительно оси Z, действующих на тело; ε – угловое ускорение; I_z – момент инерции относительно оси вращения Z.

Момент импульса симметричного твердого тела относительно центра вращения равен произведению момента инерции тела на угловую скорость:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}.$$

Момент импульса системы тел есть векторная сумма моментов импульсов всех тел системы:

$$\vec{L} = \sum \vec{L}_i = \sum I_i\vec{\omega}_i.$$

Закон сохранения момента импульса относительно точки О: если результирующий момент внешних сил, приложенных к системе, равен нулю ($\vec{M} = 0$), то момент импульса системы есть величина постоянная, т.е.

$$\vec{L} = \text{const}.$$

Проекция на ось Z момента импульса тела, вращающегося относительно неподвижной оси Z:

$$L_z = I_z\omega,$$

где ω – угловая скорость тела.

Закон сохранения момента импульса системы тел, вращающихся вокруг неподвижной оси Z:

$$I_z\omega = \text{const},$$

где I_z – момент инерции системы тел относительно оси Z; ω – угловая скорость вращения тел системы вокруг оси Z.

Кинетическая энергия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси Z:

$$W_к = \frac{1}{2}I_z\omega^2 \quad \text{или} \quad W_к = \frac{L_z^2}{2I_z}.$$

При повороте тела относительно оси Z на угол $d\varphi$ совершается работа:

$$dA = M_z d\varphi.$$

Смещение частицы от положения равновесия, ее скорость и ускорение при гармонических колебаниях определяется уравнениями:

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_0), \qquad v = \dot{x} = \omega A\cos(\omega t + \varphi_0),$$

$$a = \dot{v} = \ddot{x} = -\omega^2 A\sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x,$$

где A – амплитуда колебания, ω – циклическая частота, φ_0 – начальная фаза.

Циклическая частота ω, период колебаний T и частота ν связаны соотношениями:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одинакового периода получается гармоническое колебание того же периода $x = A\sin(\omega t + \varphi)$, амплитуда которого A и начальная фаза φ определяются уравнениями:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)},$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{A_1\sin\varphi_1 + A_2\sin\varphi_2}{A_1\cos\varphi_1 + A_2\cos\varphi_2},$$

где A_1 и A_2 – амплитуды складываемых колебаний, φ_1 и φ_2 – их начальные фазы.

Сила, действующая на тело при свободном гармоническом колебании (квазиупругая сила), всегда пропорциональна смещению и направлена в сторону, противоположную смещению:

$$F = ma = -m\omega_0^2 x = -kx,$$

где $k = m\omega_0^2$ – коэффициент квазиупругой силы, определяемый силой, вызывающей смещение x, равное единице.

При отсутствии сопротивления среды циклическая частота ω_0 свободных гармонических колебаний, называемая собственной циклической частотой, и период T равны:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Период колебаний математического маятника длиной ℓ равен

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}.$$

Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgd}},$$

где I – момент инерции маятника относительно оси качания, d – расстояние от оси до его центра тяжести.

Полная энергия тела, совершающего свободные незатухающие гармонические колебания, постоянна и равна

$$W = \frac{m\omega^2 A^2}{2}.$$

Уравнение смещения в затухающих колебаниях при наличии силы сопротивления $F_{сопр}$, пропорциональной скорости ($F_{сопр} = -rv$, где r – коэффициент сопротивления) имеет вид

$$x = A_0 e^{-\beta t}\sin(\omega t + \varphi_0).$$

Здесь $A_0 e^{-\beta t}$ – убывающая во времени амплитуда смещения; β – коэффициент затухания; ω – циклическая частота; A_0, φ_0 – начальная амплитуда и фаза (определяются из начальных условий). Величины β и ω выражаются через параметры системы r, m, k согласно формулам:

$$\beta = \frac{r}{2m},$$

$$\omega = \sqrt{\omega_o^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{r^2}{4m^2}}.$$

Логарифмический декремент затухания

$$\lambda = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \beta T,$$

где A_1 и A_2 – амплитуды двух последовательных колебаний.

Амплитуда вынужденных колебаний

$$A = \frac{h}{\sqrt{\left(\omega_o^2 - \omega^2\right)^2 + 4\beta^2\omega^2}},$$

где h есть отношение амплитуды вынуждающей силы к массе тела; ω_o – собственная циклическая частота; ω – циклическая частота вынуждающей силы.

Резонансная циклическая частота равна

$$\omega_{рез} = \sqrt{\omega_o^2 - 2\beta^2}.$$

Примеры решения задач по механике

Пример 1: Уравнение движения материальной точки имеет вид: $x = A + Bt + Ct^4$ (м), где A = 1м, B = 2м/с, C = –0,5 м/с^4. Найти координату, скорость и ускорение точки в момент времени t_1 = 3 с.

Решение: Координату x_1 точки находим, подставляя численные значения в уравнение движения.

$$x_1 = (1 + 2\cdot 3 - 0{,}5\cdot 81)\,\text{м} = 33{,}5\ \text{м}.$$

Мгновенная скорость точки

$$v_x = \frac{dx}{dt} = B + 4Ct^3.$$

Мгновенное ускорение точки

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = 12Ct^2.$$

В момент времени t_1 = 3 с

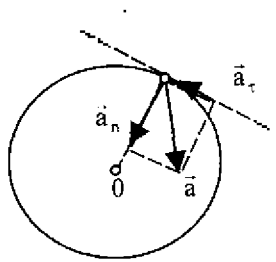
$$v_x = (2 - 4\cdot 0{,}5\cdot 27)\,\text{м/с} = -52\ \text{м/с}.$$

$$a_x = -12\cdot 0{,}5\cdot 9\ \text{м/с}^2 = -54\ \text{м/с}^2.$$

Следовательно, точка движется в отрицательном направлении оси OX равнозамедленно.

Ответ: $x_1 = 33{,}5$ м, $v_x = -52$ м/с, $a_x = -54\ \text{м/с}^2$.

Пример 2. Тело вращается вокруг неподвижной оси по закону $\varphi = A + Bt + Ct^2$ (рад), где A = 10 рад; B = 20 рад/с; C = –2 рад/с^2. Найти полное ускорение точки, находящейся на расстоянии r = 0,1 м от оси вращения в момент времени t_1 = 4 с.



Решение: Полное ускорение $\vec{a}$ точки, движущейся по кривой линии, может быть найдено как геометрическая сумма тангенциального ускорения $\vec{a}_\tau$, направленного по касательной к траектории, и нормального ускорения $\vec{a}_n$, направленного к центру кривизны траектории:

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n .$$

Так как векторы $\vec{a}_\tau$ и $\vec{a}_n$ взаимно перпендикулярны, то модуль ускорения

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} . \qquad (1)$$

Модули тангенциального и нормального ускорения точки вращающегося тела выражаются формулами

$$a_\tau = \varepsilon r ; \qquad a_n = \omega^2 r ,$$

где ω – модуль угловой скорости тела; ε – модуль его углового ускорения. Подставляя выражения a_τ и a_n в формулу (1), находим

$$a = \sqrt{\varepsilon^2 r^2 + \omega^4 r^2} = r\sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4} . \qquad (2)$$

Угловую скорость ω найдем, взяв первую производную от угла поворота по времени

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = B + 2Ct .$$

В момент времени $t_1 = 4$ с модуль угловой скорости

$$\omega = (20 + 2\cdot(-2)\cdot 4) \text{ рад/с} = 4 \text{ рад/с} .$$

Угловое ускорение найдем, взяв первую производную от угловой скорости по времени, т.е.

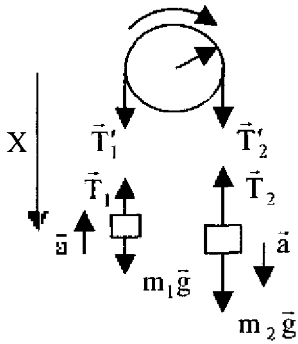
$$\omega = \frac{d\omega}{dt} = 2C = -4 \text{ рад/с}^2 .$$

Подставляя значения ω, ε и r в формулу (2), получим

$$a = 0{,}1\sqrt{(-4)^2 + 4^4} \text{ м/с}^2 = 1{,}65 \text{ м/с}^2 .$$

Ответ: $a = 1{,}65$ м/с^2.

Пример 3. Через блок в виде сплошного диска, имеющего массу $m = 80$ г, перекинута тонкая гибкая нить, к концам которой подвешены грузы с массами $m_1 = 100$ г и $m_2 = 200$ г. Определить ускорение, с которым будут двигаться грузы, если их предоставить самим себе. Трением и массой нити пренебречь.



Решение: Силы, действующие на каждый груз и на блок, изображены на рисунке. Направим ось X вертикально вниз и напишем для каждого груза уравнение движения (второй закон Ньютона) в проекциях на эту ось. Для первого груза:

$$m_1 g - T_1 = -m_1 a\ ; \qquad (1)$$

для второго груза

$$m_2 g - T_2 = m_2 a\ . \qquad (2)$$

Под действием моментов сил T_1' и T_2' относительно оси Z, перпендикулярной плоскости чертежа и направленной от нас, блок приобретает угловое ускорение ε. Согласно основному уравнению динамики вращательного движения относительно неподвижной оси:

$$T_2' r - T_1' r = I_z \varepsilon\ , \qquad (3)$$

где $\varepsilon = \dfrac{a}{r}$; $I_z = \dfrac{1}{2} m r^2$ – момент инерции блока относительно оси Z.

Согласно третьему закону Ньютона, с учетом невесомости нити $T_1' = T_1$; $T_2' = T_2$. Воспользовавшись этим, подставим в уравнение (3) вместо T_1' и T_2' выражения T_1 и T_2, предварительно получив их из уравнений (1) и (2).

$$(m_2 g - m_2 a) r - (m_1 g + m_1 a) r = \frac{m r^2 a}{2r}\ .$$

Тогда

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2 + m/2} g . \qquad (4)$$

После подстановки числовых значений в формулу (4) получим

$$a = \frac{(200 - 100)}{\left(200 + 100 + 80/2\right)} \cdot 9{,}8 = 2{,}88 \text{ м} / \text{с}^2 .$$

Ответ: $a = 2{,}88 \text{ м} / \text{с}^2$.

Пример 4. Сплошной цилиндр массой 0,5 кг и радиусом 0,02 м вращается относительно оси, совпадающей с осью цилиндра, по закону $\varphi = 12 + 8t - 0{,}5t^2$ (рад). На цилиндр действует сила, касательная к поверхности. Определить эту силу и тормозящий момент.

Решение: Угловое ускорение определяется как вторая производная от угла поворота по времени

$$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{d\omega}{dt},$$

где ω – угловая скорость, равная $\frac{d\varphi}{dt}$. Следовательно,

$$\omega = 8 - t .$$

Тогда $\varepsilon = -1$ рад/с^2.

Момент силы относительно оси вращения

$$M_z = F r \sin\alpha .$$

Сила, действует касательно к поверхности, поэтому $\sin\alpha = 1$, тогда $M_z = Fr$, откуда

$$F = \frac{M_z}{r} .$$

Тормозящий момент можно определить из основного уравнения динамики вращательного движения

$$M_z = I\varepsilon ,$$

где I – момент инерции цилиндра относительно оси вращения. В данном случае ось вращения совпадает с осью цилиндра, поэтому

$$I = \frac{1}{2} mr^2 .$$

Тогда

$$M_z = \frac{1}{2} mr^2 \varepsilon ,$$

$$M_z = \frac{1}{2} 0{,}5 \cdot (0{,}02)^2 \cdot (-1) = -1 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Знак минус у M_z означает, что сила оказывает тормозящее действие.

Модуль силы F, действующей на цилиндр:

$$\mathbf{F} = \frac{|M_z|}{r};$$

$$F = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{0{,}20} = 0{,}005 \text{ Н} .$$

Ответ: $F = 0{,}005$ Н; $M = -1 \cdot 10^{-4}$ Н·м .

Пример 5. Тело массой $m_1 = 1$ кг ударяется о неподвижное тело массой $m_2 = 4$ кг. Считая удар центральным и абсолютно упругим, найти, какую часть энергии первое тело передает второму при ударе.

Решение: Поскольку удар абсолютно упругий, то для него выполняется закон сохранения энергии

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2} ,$$

где v_1, v_2, u_1, u_2 – скорости тел соответственно до и после удара. Кинетическая энергия второго тела до удара была равна нулю. После удара изменение энергии второго тела $\Delta W_к = W_{к2}$, где $W_{к2}$ – кинетическая энергия второго тела после удара. По определению:

$$W_{к2} = \frac{m_2 u_2^2}{2}; \qquad W_{к1} = \frac{m_1 v_1^2}{2}.$$

По закону сохранения импульса

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2.$$

Т.к. $v_2 = 0$, то

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \qquad (1)$$

а закон сохранения импульса в проекции на ось, параллельную скорости движения первого тела, запишем так:

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2. \qquad (2)$$

Решая систему уравнений (1), (2), найдем

$$u_2 = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Кинетическая энергия второго тела после удара

$$W_{к2} = \frac{m_2 u_2^2}{2} = \frac{2m_2 m_1^2 v_1^2}{(m_1 + m_2)^2}.$$

Определим часть энергии, которую передаст первое тело при ударе:

$$\frac{W_{к2}}{W_{к1}} = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2};$$

$$\frac{W_{к2}}{W_{к1}} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 4}{(1 + 4)^2} = 0{,}64.$$

Ответ: $\frac{W_{к2}}{W_{к1}} = 0{,}64$.

Пример 6. Тело массой 1 кг под действием постоянной силы движется прямолинейно. Зависимость пути, пройденного телом, от времени задана уравнением $S = 2t^2 + 4t + 1$ (м). Определить работу

силы за 10 с от начала ее действия и зависимость кинетической энергии от времени.

Решение: Работа, совершаемая силой, равна:

$$A = \int_1^2 F\,dS.$$

Сила, действующая на тело, по второму закону Ньютона равна

$$F = ma \qquad \text{или} \qquad F = m\frac{d^2S}{dt^2}.$$

Мгновенное ускорение определяется первой производной от скорости по времени или второй производной от пути по времени. В соответствии с этим

$$v = \frac{dS}{dt} = 4t + 4; \tag{1}$$

$$a = \frac{d^2S}{dt^2} = 4\ м/с^2. \tag{2}$$

Тогда

$$F = m\frac{d^2S}{dt^2} = 4m. \tag{3}$$

Из выражения (1) находим

$$dS = (4t + 4)dt. \tag{4}$$

Используя (3) и (4), для работы A получаем:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} 4m\,(4t + 4)\,dt.$$

По этой формуле вычислим работу, совершаемую силой за первые 10 с движения ($t_1 = 0$, $t_2 = 10$ с):

$$A = \int_0^{10} (16\,m\,t + 16\,m)\,dt = m\left[\frac{16\,t^2}{2} + 16\,t\right]_0^{10}$$

$$A = 1\cdot(8\cdot 100 + 16\cdot 10) = 960\ Дж.$$

Кинетическая энергия тела

$$W_к = \frac{mv^2}{2}. \qquad (5)$$

Подставляя (4) в формулу (5), получаем:

$$W_к = \frac{m\,(4t+4)^2}{2} = m\,(8t^2+16t+8) = (8t^2+16t+8)Дж.$$

Ответ: А = 960 Дж; $W_к = (8t^2+16t+8)$Дж.

Пример 7. Платформа в виде сплошного диска радиусом R = 1,5 м и массой m_1 = 180 кг вращается вокруг вертикальной оси с частотой n = 10 мин $^{-1}$. В центре платформы стоит человек массой m_2 = 60 кг. Какую линейную скорость v относительно пола помещения будет иметь человек, если он перейдет на край платформы?

Решение: Согласно условию задачи, момент внешних сил относительно оси вращения Z, совпадающей с геометрической осью платформы, можно считать равным нулю. При этом условии проекция L_z момента импульса системы платформа – человек остается постоянной.

$$L_z = I_z\omega = const, \qquad (1)$$

где I_z – момент инерции платформы с человеком относительно оси Z; ω – угловая скорость платформы.

Момент инерции системы равен сумме моментов инерции тел, входящих в состав системы, поэтому в начальном состоянии

$$I_z = I_1 + I_2,$$

а в конечном состоянии

$$I'_z = I'_1 + I'_2.$$

С учетом этого равенство (1) примет вид:

$$(I_1 + I_2)\omega = (I'_1 + I'_2)\omega', \qquad (2)$$

где значения моментов инерции I_1 и I_2 платформы и человека соответственно относятся к начальному состоянию системы, I'_1 и I'_2 – к конечному.

Момент инерции платформы относительно оси Z при переходе человека не изменяется:

$$I_1 = I_1' = \frac{1}{2} m_1 R^2 .$$

Момент инерции человека относительно той же оси будет изменяться. Если рассматривать человека как материальную точку, то его момент инерции I_2 в начальном состоянии можно считать равным нулю. В конечном состоянии момент инерции человека

$$I_2' = m_2 R^2 .$$

Подставим в формулу (2) выражения для моментов инерции, начальной угловой скорости вращения платформы с человеком ($\omega = 2\pi n$) и конечной угловой скорости ($\omega' = {}^{v}/_{R}$, где v – скорость человека относительно пола). Получаем

$$\left(\frac{1}{2} m_1 R^2 + 0\right) 2\pi n = \left(\frac{1}{2} m_1 R^2 + m_2 R^2\right) \cdot \frac{v}{R},$$

откуда

$$v = \frac{2\pi n R m_1}{(m_1 + 2m_2)},$$

$$v = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1{,}5 \cdot 180}{180 + 2 \cdot 60} = 1 \text{ м/с}.$$

Ответ: v = 1 м/с.

Пример 8. Диск массой m = 2 кг, радиусом R = 10 см вращается вокруг горизонтальной оси, проходящей через его центр с частотой n = 600 мин$^{-1}$. Через Δt = 20 с под действием тормозящего момента диск остановился. Считая массу диска равномерно распределенной, найти тормозящий момент M и число оборотов N, которое сделает диск до полной остановки.

Решение: Для определения тормозящего момента M сил, действующих на тело, нужно использовать основное уравнение динамики вращательного движения

$$I\,\Delta\omega = M\,\Delta t, \qquad (1)$$

где I – момент инерции диска относительно оси, проходящей через его центр масс; $\Delta\omega$ – изменение угловой скорости за промежуток времени Δt.

По условию задачи $\Delta\omega = -\omega_0$, где ω_0 – начальная угловая скорость, т.к. конечная угловая скорость $\omega = 0$. Выразим начальную угловую скорость через частоту вращения диска. Тогда

$$\omega_0 = 2\pi n \quad \text{и} \quad \Delta\omega = -2\pi n.$$

Момент инерции диска

$$I = \frac{mR^2}{2},$$

где m – масса диска; R – его радиус. Тогда формула (1) примет вид

$$M = \frac{-\pi n m R^2}{\Delta t},$$

$$M = \frac{-3{,}14 \cdot 10 \cdot 2\text{г} \cdot 0{,}01}{20} = -3{,}1 \cdot 10^{-2}\ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Знак минус у M указывает на то, что на диск действует тормозящая сила.

Угол поворота за время вращения диска до остановки может быть определен по формуле для равнозамедленного вращения

$$\varphi = \omega_0\,\Delta t - \frac{\varepsilon\,(\Delta t)^2}{2}, \qquad (2)$$

где ε – угловое ускорение. По условию задачи, $\omega = \omega_0 - \varepsilon\,\Delta t$; $\omega = 0$; $\varepsilon\,\Delta t = \omega_0$. Тогда из формулы (2)

$$\varphi = \omega_0\,\Delta t - \frac{\omega_0\,\Delta t}{2} = \frac{\omega_0\,\Delta t}{2}.$$

Так как

$$\varphi = 2\pi N, \qquad \omega_0 = 2\pi n,$$

то число полных оборотов

$$N = \frac{n\,\Delta t}{2};$$

$$N = \frac{10 \cdot 20}{2} = 100.$$

Ответ: $M = -3{,}1 \cdot 10^{-2}$ Н·м; $N = 100$.

Пример 9. Частица массой $m = 0{,}01$ кг совершает гармонические колебания с периодом $T = 2$ с. Полная энергия колеблющейся частицы $E = 0{,}1$ мДж. Определить амплитуду A колебаний и наибольшее значение силы F_{max}, действующей на частицу.

Решение: Для определения амплитуды колебаний воспользуемся выражением для полной энергии частицы

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2,$$

где $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$. Отсюда искомая амплитуда равна

$$A = \frac{T}{2\pi}\sqrt{\frac{2E}{m}}. \qquad (1)$$

Так как частица совершает гармонические колебания, то сила, действующая на нее, является квазиупругой и, следовательно, может быть выражена соотношением

$$F = -kx,$$

где k – коэффициент квазиупругой силы; x – смещение колеблющейся точки. Максимальная сила будет при максимальном смещении x_{max}, равном амплитуде,

$$F_{max} = kA. \qquad (2)$$

Коэффициент k выразим через период колебаний

$$k = m\omega^2 = \frac{4\pi^2 m}{T^2}. \qquad (3)$$

Подставив выражения (1) и (3) в (2), получим

$$F_{max} = 2\pi\frac{\sqrt{2mE}}{T},$$

$$A = \frac{2}{2\cdot 3{,}14}\sqrt{\frac{2\cdot 10^{-4}}{10^{-2}}} = 0{,}045\ \text{м} = 45\ \text{см}.$$

$$F_{max} = \frac{2\cdot 3{,}14}{2}\sqrt{2\cdot 10^{-2}\cdot 10^{-4}} = 4{,}44\cdot 10^{-3}\ \text{Н} = 4{,}44\ \text{мН}.$$

Ответ: $A = 45$ см ; $F_{max} = 4{,}44$ мН.

Контрольная работа № 1

101. Материальная точка движется прямолинейно. Уравнение движения имеет вид: $S = 2t + 0{,}04t^3$ (расстояние – в метрах, время – в секундах). Найти скорость и ускорение точки в моменты времени $t_1 = 0$ и $t_2 = 5$ с. Каковы средние значения скорости и ускорения за первые 5 с движения?

102. Материальная точка движется по окружности радиуса 80 см согласно уравнению $S = 10t - 0{,}1t^3$ (расстояние – в метрах, время – в секундах). Найти скорость, тангенциальное, нормальное и полное ускорения точки в момент времени $t_1 = 2$ с.

103. Точка движется по прямой согласно уравнению $x = 6t - \frac{t^3}{8}$ (м). Определите среднюю скорость движения точки в интервале времени от $t_1 = 2$ с до $t_2 = 6$ с, скорость и ускорение точки в момент времени $t_2 = 6$ с.

104. Движения двух материальных точек выражается уравнениями: $x_1 = 20 + 2t - 4t^2$ (м) и $x_2 = 2 + 2t + 0{,}5t^2$ (м). В какой момент времени скорости этих материальных точек будут одинаковыми? Чему равны скорости и ускорения точек в этот момент?

105. Зависимость пройденного телом пути S от времени t дается уравнением $S = At - Bt^2 + Ct^3$ (м), где $A = 2$ м/с, $B = 3$ м/с^2, $C = 4$ м/с^3. Найти: 1) зависимость скорости v и ускорения a от времени t; 2) расстояние, пройденное телом, скорость и ускорение тела через 2 с после начала движения.

106. Зависимость пройденного телом пути S от времени t дается уравнением $S = A - Bt + Ct^2$ (м), где $A = 6$ м, $B = 3$ м/с, $C = 2$ м/с^2. Найти среднюю скорость и среднее ускорение тела в интервале времени от 1 до 4 с, скорость и ускорение в момент времени $t_1 = 4$ с.

107. Зависимость пройденного телом пути S от времени t дается уравнением $S = A + Bt + Ct^2$ (м), где A = 3 м, B = 2 м/с и C = 1 м/с^2. Найти среднюю скорость и среднее ускорение тела за первую, вторую и третью секунды его движения.

108. Зависимость пройденного телом пути S от времени t дается уравнением $S = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$ (м), где C = 0,14 м/с^2 и D = = 0,01 м/с^3. 1) Через сколько времени после начала движения ускорение тела будет равно 1 м/с^2? 2) Чему равно среднее ускорение тела за этот промежуток времени?

109. Тело движется прямолинейно под действием постоянной силы 15 Н. Зависимость координаты от времени имеет вид $x = 10 - 5t + 2t^2$ (м). Найти массу тела.

110 Тело массой 0,5 кг движется прямолинейно, причем зависимость пройденного телом пути S от времени t дается уравнением $S = A - Bt + Ct^2 - Dt^3$ (м), где C = 5м/с^2 и D = 1 м/с^3. Найти силу, действующую на тело в конце первой секунды движения.

111. Сплошной диск массой 0,2 кг вращается вокруг оси, проходящей через его центр масс, под действием момента сил $0{,}8 \cdot 10^{-2}$ Н·м. Закон вращения имеет вид $\varphi = 5 - t + 2t^2$ (рад). Определить радиус диска.

112. Определить полное ускорение в момент времени $t_1 = 3$ с точки, находящейся на ободе колеса радиусом R = 0,5 м, вращающегося согласно уравнению $\varphi = At + Bt^3$, где A = 2 рад/с; B = 0,2 рад/с^3.

113. Диск радиусом R = 0,2 м вращается согласно уравнению $\varphi = A + Bt + Ct^3$ (рад), где A = 3 рад; B = –1 рад/с; C = 0,1 рад/с^3. Определить тангенциальное a_τ, нормальное a_n и полное a ускорение точек на окружности диска для момента времени $t_1 = 10$ с.

114. Колесо радиусом R = 0,1 м вращается так, что зависимость угла поворота колеса от времени дается уравнением $\varphi = A + Bt + Ct^3$ (рад), где B = 2 рад/с; C = 1 рад/с^3. Для точек, ле-

жащих на ободе колеса, найти через 2 с после начала движения: 1) угловую скорость; 2) линейную скорость; 3) угловое ускорение; 4) тангенциальное ускорение; 5) нормальное ускорение.

115. Колесо вращается так, что зависимость угла поворота колеса от времени дается уравнением $\varphi = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$ (рад), где $B = 1$ рад/с; $C = 1$ рад/с^2; $D = 1$ рад/с^3. Найти радиус колеса, если известно, что к концу второй секунды движения нормальное ускорение точек, лежащих на ободе колеса, равно $a_n = 3{,}46 \cdot 10^2$ м/с^2.

116. Точка движется по окружности радиусом $R = 20$ см с постоянным тангенциальным ускорением $a_\tau = 5$ см/с^2. Через сколько времени после начала движения нормальное ускорение a_n точки будет: 1) равно тангенциальному; 2) вдвое больше тангенциального?

117. Точка движется по окружности радиусом $R = 2$ см. Зависимость пройденного пути от времени дается уравнением $S = Ct^3$, где $C = 0{,}1$ см/с^3. Найти нормальное и тангенциальное ускорения точки в момент, когда линейная скорость точки $v = 0{,}3$ м/с.

118. Точка движется по окружности так, что зависимость пути от времени дается уравнением $S = A + Bt + Ct^2$ (м), где $B = -2$ м/с и $C = 1$ м/с^2. Найти линейную скорость точки, ее тангенциальное, нормальное и полное ускорения через $t_1 = 3$ с после начале движения, если известно, что нормальное ускорение точки при $t_2 = 2$ с равно $a_n = 0{,}5\,\text{м/с}^2$.

119. Колесо радиусом $R = 0{,}1$ м вращается так, что зависимость угла поворота радиуса колеса от времени дается уравнением $\varphi = A + Bt + Ct^3$ (рад), где $B = 2$ рад/с и $C = 1$ рад/с^3. Для точек, лежащих на ободе колеса, найти через 2 с после начала движения: 1) угловую скорость; 2) линейную скорость; 3) угловое ускорение; 4) тангенциальное ускорение; 5) нормальное ускорение.

120. Колесо радиусом $R = 5$ см вращается так, что зависимость угла поворота колеса от времени дается уравнением $\varphi = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$ (рад), где $D = 1$ рад/с^3. Для точек, лежащих на

ободе колеса, найти изменение тангенциального ускорения Δa_τ за каждую секунду движения.

121. Железнодорожный вагон тормозится, и его скорость равномерно изменяется за время $\Delta t = 3{,}3$ с от $v_1 = 47{,}5$ км/ч до $v_2 = 30$ км/ч. При каком предельном значении коэффициента трения между чемоданом и полкой чемодан при торможении начинает скользить по полке?

122. Канат лежит на столе так, что часть его свешивается со стола, и начинает скользить тогда, когда длина свешивающейся части составляет 25% всей его длины. Чему равен коэффициент трения каната о стол?

123. На автомобиль массой 2 т во время движения действует сила трения, равная 0,1 его силы тяжести. Найти силу тяги, развиваемую мотором автомобиля, если автомобиль движется с постоянной скоростью: 1) в гору с уклоном 1 м на каждые 25 м пути; 2) под гору с тем же уклоном.

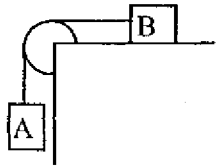
124. Найти силу тяги, развиваемую мотором автомобиля, движущегося в гору с ускорением 1 м/с^2. Уклон горы равен 1 м на каждые 25 м пути. Масса автомобиля 1 т. Коэффициент трения равен 0,1.

125. Тело лежит на наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 4°. 1) При каком предельном значении коэффициента трения тело начнет скользить по наклонной плоскости? 2) С каким ускорением будет скользить тело по плоскости, если коэффициент трения равен 0,03? 3) Сколько времени потребуется для прохождения при этих условиях 100 м пути? 4) Какую скорость тело будет иметь в конце этих 100 м?

126. Тело скользит по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол $\alpha = 45°$. Пройдя расстояние $S = 36{,}4$ см, тело приобретает скорость $v = 2$ м/с. Чему равен коэффициент трения тела о плоскость?

127. Тело скользит по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 45°. Зависимость пройденного телом расстояния S

от времени t дается уравнением $S = Ct^2$ (м), где $C = 1{,}73$ м/с^2. Найти коэффициент трения тела о плоскость.



128. Невесомый блок укреплен на конце стола (см. рис.). Гири А и В равной массы $m_1 = m_2 = 1$ кг соединены нитью, перекинутой через блок. Коэффициент трения гири В о стол $k = 0{,}1$. Найти: 1) ускорение, с которым движутся гири; 2) силу натяжения нити. Трением в блоке пренебречь.

129. Камень, пущенный по поверхности льда со скоростью $v = 2$ м/с, прошел до полной остановки расстояние $S = 20{,}4$ м. Найти коэффициент трения камня о лед, считая его постоянным.

130. Шайба, пущенная по поверхности льда с начальной скоростью $v_o = 20$ м/с, остановилась через $t = 40$ с. Найти коэффициент трения шайбы о лед.

131. По небольшому куску мягкого железа, лежащему на наковальне массой $m_1 = 300$ кг, ударяет молот массой $m_2 = 8$ кг. Определить к.п.д. η удара, если удар неупругий. Полезной считать энергию, затраченную на деформацию куска железа.

132. Шар массой $m_1 = 3$ кг движется со скоростью $v_1 = 2$ м/с и сталкивается с покоящимся шаром массой $m_2 = 5$ кг. Какая работа будет совершена при деформации шаров? Удар считать абсолютно неупругим, прямым, центральным.

133. Молот массой $m = 5$ кг, двигаясь со скоростью $v = 4$ м/с, ударяет по железному изделию, лежащему на наковальне. Масса наковальни с изделием равна $M = 95$ кг. Считая удар абсолютно неупругим, определить энергию, расходуемую на ковку (деформацию) изделия. Чему равен к.п.д. процесса ковки при данных условиях?

134. Из орудия, не имеющего противооткатного устройства, производилась стрельба в горизонтальном направлении. Когда орудие было неподвижно закреплено, снаряд вылетел со скоростью $v_1 = 600$ м/с, а когда орудию дали возможность свободно откаты-

ваться назад, снаряд вылетел со скоростью $v_2 = 580$ м/с. С какой скоростью откатилось при этом орудие?

135. Шар массой m_1, движущийся горизонтально с некоторой скоростью v_1, столкнулся с неподвижным шаром массой m_2. Шары абсолютно упругие, удар прямой, центральный. Какую долю своей кинетической энергии первый шар передал второму?

136. Человек массой 60 кг, бегущий со скоростью 8 км/ч, догоняет тележку массой 80 кг, движущуюся со скоростью 2,9 км/ч, и вскакивает на нее. 1) С какой скоростью станет двигаться тележка? 2) С какой скоростью будет двигаться тележка, если человек бежал ей навстречу?

137. Снаряд массой 100 кг, летящий горизонтально вдоль железнодорожного пути со скоростью 500 м/с, попадает в вагон с песком массой 10 т и застревает в нем. Какую скорость получит вагон, если: 1) вагон стоял неподвижно, 2) вагон двигался со скоростью 36 км/ч в направлении, что и снаряд, 3) вагон двигался со скоростью 36 км/ч в направлении, противоположном движению снаряда?

138. Граната, летящая со скоростью 10 м/с, разорвалась на два осколка. Бóльший осколок, масса которого составляла 60% массы всей гранаты, продолжал двигаться в прежнем направлении, но со скоростью, равной 25 м/с. Найти скорость меньшего осколка.

139. Тело массой 1 кг, движущееся горизонтально со скоростью 1 м/с, догоняет второе тело 0,5 кг и неупруго сталкивается с ним. Какую скорость получат тела, если: 1) второе тело стояло неподвижно; 2) второе тело двигалось со скоростью 0,5 м/с в том же направлении, что и первое тело; 3) второе тело двигалось со скоростью 0,5 м/с в направлении, противоположном направлению движения первого тела.

140 Конькобежец массой 70 кг, стоя на коньках на льду, бросает в горизонтальном направлении камень массой 3 кг со скоростью 8 м/с. Найти, на какое расстояние откатится при этом конькобежец, если известно, что коэффициент трения коньков о лед равен 0,02.

141. Определить работу растяжения двух соединенных последовательно пружин жесткостями $k_1 = 400$ Н/м и $k_2 = 400$ Н/м, если первая при этом растянулась на $\Delta l = 2$ см.

142. Из шахты глубиной $h = 600$ м поднимают клеть массой $m_1 = 3,0$ т на канате, каждый метр которого имеет массу $m = 1,5$ кг. Какая работа А совершается при поднятии клети на поверхность Земли? Каков коэффициент полезного действия η подъемного устройства?

143. Пружина жесткостью $k = 500$ Н/м сжата силой $F = 100$ Н. Определить работу А внешней силы, дополнительно сжимающей пружину еще на $\Delta l = 2$ см.

144. Две пружины жесткостью $k_1 = 0,5$ кН/м и $k_2 = 1$ кН/м скреплены параллельно. Определить потенциальную энергию данной системы при абсолютной деформации $\Delta l = 4$ см.

145. Какую нужно совершить работу, чтобы пружину жесткостью $k = 800$ Н/м, сжатую на $x = 6$ см, дополнительно сжать на $\Delta x = 8$ см?

146. С какой скоростью двигался вагон массой 20 т, если при ударе о стенку каждый буфер сжался на 10 см? Известно, что пружина каждого из буферов сжимается на 1 см под действием силы в $9,8 \cdot 10^3$ Н.

147. Из пружинного пистолета с пружиной жесткостью $k = 150$ Н/м был произведен выстрел пулей массой $m = 8$ г. Определить скорость v пули при вылете ее из пистолета, если пружина была сжата на $\Delta x = 4$ см.

148. Налетев на пружинный буфер, вагон массой $m = 16$ т, двигавшийся со скоростью $v = 0,6$ м/с, остановился, сжав пружину на $\Delta l = 8$ см. Найти общую жесткость k пружин буфера.

149. Если на верхний конец вертикально расположенной спиральной пружины положить груз, то пружина сожмется на $\Delta l = 3$ мм. На сколько сожмет пружину тот же груз, упавший на конец пружины с высоты $h = 8$ см?

150. Определить работу растяжения двух соединенных последовательно пружин жесткостями $k_1 = 400$ Н/м и $k_2 = 250$ Н/м, если первая пружина при этом растянулась на $\Delta l = 2$ см.

151. Нить с привязанными к ее концам грузами массами $m_1 = 50$ г и $m_2 = 60$ г перекинута через блок диаметром $D = 4$ см. Определить момент инерции I блока, если под действием силы тяжести грузов он получил угловое ускорение $\varepsilon = 1{,}5$ рад/с^2. Трением и проскальзыванием нити по блоку пренебречь.

152. На скамье Жуковского сидит человек и держит на вытянутых руках гири массой $m = 5$ кг каждая. Расстояние от каждой гири до оси скамьи $l = 70$ см. Скамья вращается с частотой $n_1 = 1$ с$^{-1}$. Как изменится частота вращения скамьи и какую работу А произведет человек, если он сожмет руки так, что расстояние от каждой гири до оси уменьшится до $l_2 = 20$ см? Момент инерции человека и скамьи (вместе) относительно оси $I = 2{,}5$ кг·м^2.

153. На скамье Жуковского сидит человек и держит в руках стержень вертикально параллельно оси скамьи. Скамья с человеком вращается с угловой скоростью $\omega_1 = 4$ рад/с. С какой угловой скоростью ω_2 будет вращаться скамья с человеком, если повернуть стержень так, чтобы он занял горизонтальное положение? Суммарный момент инерции человека и скамьи $I = 5$ кг·м^2. Длина стержня $l = 1{,}8$ м; масса $m = 6$ кг. Считать, что центр масс стержня с человеком находится на оси платформы.

154. На краю платформы в виде диска, вращающейся по инерции вокруг вертикальной оси с частотой $n_1 = 8$ мин$^{-1}$, стоит человек массой $m_1 = 70$ кг. Когда человек перешел в центр платформы, она стала вращаться с частотой $n_2 = 10$ мин$^{-1}$. Определить массу m_2 платформы. Момент инерции человека рассчитывать, как для материальной точки.

155. На краю неподвижной скамьи Жуковского диаметром $D = 0{,}8$ м и массой $m_1 = 6$ кг стоит человек массой $m_2 = 60$ кг. С какой угловой скоростью ω начнет вращаться скамья, если человек поймает летящий на него мяч массой $m = 0{,}5$ кг? Траектория мяча

горизонтальна и проходит на расстоянии $r = 0,4$ м от оси скамьи. Скорость мяча $v = 5$ м/с.

156. Горизонтальная платформа массой $m_1 = 150$ кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, с частотой $n = 8$ мин$^{-1}$. Человек массой $m_2 = 70$ кг стоит при этом на краю платформы. С какой угловой скоростью ω начнет вращаться платформа, если человек перейдет от края платформы к ее центру? Считать платформу круглым однородным диском, а человека – материальной точкой.

157. Тонкий длинный стержень массой 300 г и длиной 50 см вращается с угловой скоростью 10 с$^{-1}$ в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через середину стержня. Найти угловую скорость, если в процессе вращения в той же плоскости стержень переместился так, что ось вращения пройдет через конец стержня.

158. Платформа в виде диска диаметром $D = 3$ м и массой $m_1 = 180$ кг может вращаться вокруг вертикальной оси. С какой угловой скоростью ω_1 будет вращаться эта платформа, если по ее краю пройдет человек массой $m_2 = 70$ кг со скоростью $v = 1,8$ м/с относительно платформы?

159. Какой скоростью должен обладать шар, катящийся без скольжения, чтобы подняться по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30°, на высоту 2 м, если сила сопротивления равна 0,2 веса шара? Чему равно время подъема?

160. Блок, имеющий форму диска массой $m = 0,4$ кг, вращается под действием силы натяжения нити, к концам которой подвешены грузы массами $m_1 = 0,3$ кг и $m_2 = 0,7$ кг. Определить силы натяжения T_1 и T_2 нити по обе стороны блока.

161. Колесо, вращаясь равнозамедленно при торможении, уменьшило за 1 мин частоту вращения от 300 до 180 об/мин. Момент инерции колеса равен 2 кг·м^2. Найти: 1) угловое ускорение колеса; 2) тормозящий момент; 3) работу сил торможения; 4) число оборотов, сделанных колесом за эту минуту.

162. Вентилятор вращается с угловой скоростью, соответствующей частоте 900 об/мин. После выключения вентилятор, вращаясь равнозамедленно, сделал до остановки 75 об. Работа сил торможения равна 44,4 Дж. Найти: 1) момент инерции вентилятора; 2) момент сил торможения.

163. Маховое колесо, имеющее момент инерции $I = 245$ кг·м^2, вращается, делая 20 об/с. После того как на колесо перестал действовать тормозящий момент, оно остановилось, сделав 1000 об. Найти: 1) момент сил трения; 2) время, прошедшее от момента прекращения действия вращающегося момента до полной остановки колеса.

164. По ободу шкива, насаженного на общую ось с маховым колесом, намотана нить, к концу которой подвешен груз массой 1 кг. На какое расстояние должен опуститься груз, чтобы колесо со шкивом получило угловую скорость, соответствующую частоте 60 об/мин? Момент инерции колеса со шкивом 0,42 кг·м^2, радиус шкива 10 см.

165. Маховое колесо начинает вращаться с постоянным угловым ускорением $\varepsilon = 0,5$ рад/с^2 и через $t_1 = 15$ с после начала движения приобретает момент импульса $L = 73,5$ кг·м^2/с. Найти кинетическую энергию колеса через $t_2 = 20$ с после начала вращения.

166. Маховик вращается с постоянной скоростью, соответствующей частоте $n = 10$ об/с; его кинетическая энергия $W_к = 7,85$ Дж. За сколько времени вращающий момент $M = 50$ Н·м, приложенный к этому маховику, увеличит его угловую скорость в два раза?

167. К ободу диска массой $m = 5$ кг приложена постоянная касательная сила $F = 19,6$ Н. Какую кинетическую энергию будет иметь диск через $\Delta t = 5$ с после начала действия силы?

168. На какой угол надо отклонить однородный стержень, подвешенный на горизонтальной оси, проходящей через верхний конец стержня, чтобы нижний конец стержня при прохождении им положения равновесия имел скорость 5 м/с? Длина стержня 1 м.

169. Однородный стержень длиной 85 см подвешен на горизонтальной оси, проходящей через верхний конец стержня. Какую наименьшую скорость надо сообщить нижнему концу стержня, чтобы он сделал полный оборот вокруг оси?

170. На какую высоту вкатывается по наклонной плоскости обруч, если у основания линейная скорость точек на обруче 5 м/с.

171. Точка совершает простые гармонические колебания, уравнение которых $x = A\sin\omega t$, где $A = 5$ см, $\omega = 2$ с$^{-1}$. В момент времени, когда точка обладала потенциальной энергией $W_p = 0{,}1$ мДж, на нее действовала возвращающая сила $F = 5$ нН. Найти этот момент времени t_1.

172. Определить частоту ν простых гармонических колебаний диска радиусом $R = 20$ см около горизонтальной оси, проходящей через середину радиуса диска перпендикулярно его плоскости.

173. Определить период T простых гармонических колебаний диска радиусом $R = 40$ см около горизонтальной оси, проходящей через образующую диска.

174. Определить период T колебаний математического маятника, если модуль его максимального перемещения $\Delta r = 18$ см и максимальная скорость $v_{max} = 16$ см/с.

175. Написать уравнение гармонического колебательного движения, если максимальное ускорение точки 49,3 см/с^2, период колебаний 2 с и смещение точки от положения равновесия в начальный момент времени 25 мм.

176. Шарик массой $m = 60$ г колеблется с периодом $T = 2$ с. В начальный момент времени смещение шарика $x_0 = 4{,}0$ см и он обладает энергией $E = 0{,}02$ Дж. Записать уравнение гармонического колебания шарика и закон изменения возвращающей силы с течением времени.

177. Определить скорость v распространения волн в упругой среде, если разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний двух точек, отстоящий друг от друга на $\Delta x = 15$ см, равна $\pi/2$. Частота колебаний $\nu = 25$ Гц.

178. Поперечная волна распространяется вдоль упругого шнура со скоростью 10 м/с. Период колебаний точек шнура 1 с, амплитуда

1,5 см. Определить длину волны, скорость и ускорение точки, отстоящей от источника колебаний на расстоянии 20 см, в момент времени 5 с.

179. Определить скорость распространения волн в упругой среде, если разность фаз колебаний двух точек среды, отстоящих друг от друга на расстоянии 20 см, равна $\pi/3$. Частота колебаний 50 Гц.

180. Волны в упругой среде распространяются со скоростью 15 м/с. Чему равно смещение точки, находящейся на расстоянии 3 м от источника колебаний, через 4 с от начала колебаний? Период колебаний 1 с, амплитуда колебаний 2 см.

Статистическая физика. Термодинамика

Основные определения и формулы

Идеальным газом называют газ, молекулы которого имеют пренебрежимо малый собственный объем и не взаимодействуют друг с другом на расстоянии.

Нормальные условия: $p_o = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па, $T_o = 243{,}15$ К.

Закон Бойля-Мариотта: для данной массы газа и при $T = \text{const}$ (изотермический процесс)

$$pV = \text{const}.$$

Закон Шарля: для данной массы газа и при $V = \text{const}$ (изохорический процесс)

$$\frac{p}{T} = \text{const}.$$

Закон Гей-Люссака: для данной массы газа и при $p = \text{const}$ (изобарический процесс)

$$\frac{V}{T} = \text{const}.$$

Уравнение состояния идеального газа: для данной массы идеального газа

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M}R,$$

где m – масса газа, R – молярная газовая постоянная ($R = 8{,}31$ Дж/(моль·К)), M – молярная масса газа.

Единица количества вещества в СИ – моль.

Моль – количество вещества системы, в котором содержится столько же структурных элементов (молекул, атомов), сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода с атомной массой 12 (^{12}C).

Моли разных газов содержат одинаковое число молекул, называемое числом Авогадро $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

Величину M, равную отношению массы газа m к количеству молей ν, содержащихся в нем $\left(M = \frac{m}{\nu} \right)$, называют молярной массой газа, поэтому

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

Закон Дальтона: давление смеси газов равно сумме их парциальнных давлений:

$$p = \sum p_i .$$

Барометрическая формула, выражающая убывание давления газа с высотой h над поверхностью Земли:

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

где p_0 – давление на высоте h = 0, T – температура газа, g – ускорение силы тяжести.

Средняя квадратичная скорость:

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \ldots + v_N^2}{N}}; \qquad \langle v_{кв} \rangle^2 = \langle v^2 \rangle,$$

где v_i (i = 1, 2, … N) – скорость i-ой частицы, N – число частиц в газе.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов:

$$p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{кв} \rangle^2,$$

где n – число молекул в единице объема (концентрация молекул), $\langle \varepsilon \rangle = \langle m_0 v^2 \rangle / 2$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы. Для однородного по составу частиц газа

$$\langle \varepsilon_п \rangle = \frac{m_o \langle v_{кв} \rangle^2}{2},$$

где m_o – масса одной частицы газа. Для смеси идеальных газов $n = n_1 + n_2 + \ldots + n_N$.

Зависимость средней кинетической энергии поступательного движения молекул от температуры

$$\langle \varepsilon_п \rangle = (3/2)kT,$$

где k – постоянная Больцмана, равная

$$k = \frac{R}{N_A} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Среднеквадратичная скорость поступательного движения молекул газа:

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_o}}.$$

Наиболее вероятная скорость молекул:

$$v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m_o}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}.$$

Средняя арифметическая скорость поступательного движения молекул идеального газа:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_o}}.$$

Зависимость давления газа от концентрации n молекул и температуры T

$$p = n\,kT.$$

Числом степеней свободы i называется число независимых величин, с помощью которых может быть задано положение тела или частицы в пространстве. Для молекул одноатомного газа i = 3 (три поступательные степени свободы), двухатомного газа i = 5 (три поступательные и две вращательные степени свободы), трех- и более атомных газов i = 6 (три поступательные и три вращательные степени свободы).

Средняя кинетическая энергия (поступательного и вращательного движения) молекулы

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

Среднее число столкновений, испытываемых одной молекулой за секунду,

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

где d – эффективный диаметр молекулы, n – концентрация молекул.

Общее число столкновений всех молекул друг с другом в единице объема за единицу времени

$$Z = \frac{1}{2} \langle z \rangle\, n .$$

Средняя длина свободного пробега молекулы

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

Уравнение диффузии (закон Фика):

$$dm = -D \frac{d\rho}{dx} dS\, dt ,$$

где $\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности, dm – масса, переносимая при диффузии за время dt через малую площадь dS, расположенную перпендикулярно к оси OX, вдоль которой осуществляется перенос; D – диффузия (коэффициент диффузии).

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

Сила внутреннего трения в жидкости (газе), действующая на элемент поверхности слоя dS

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} dS,$$

где η – динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения)

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

$\frac{dv}{dx}$ – изменение скорости движения слоев на единицу длины в направлении нормали к поверхности слоя, ρ – плотность газа или жидкости.

Уравнение теплопроводности (закон Фурье):

$$dQ = -K \frac{dT}{dx} dS\, dt,$$

где dQ – количество теплоты, проходящей при теплопроводности за время dt через площадь dS, расположенную перпендикулярно к оси OX, в направлении которой осуществляется перенос тепла; K – теплопроводность (коэффициент теплопроводности), dT/dx – градиент температуры.

$$K = \frac{1}{3} c_v \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle = \eta c_v,$$

c_v – удельная теплоемкость газа в изохорическом процессе.

Первое начало термодинамики: количество теплоты, сообщенное системе, идет на увеличение ее внутренней энергии и совершение системой работы над окружающими телами

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

Изменение внутренней энергии для идеального газа

$$\Delta U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} R\, \Delta T.$$

Молярная теплоемкость измеряется количеством теплоты, необходимым для нагревания одного моля вещества на один Кельвин:

$$C = \frac{1}{\nu} \frac{dQ}{dT},$$

где $\nu = m/M$ – количество вещества.

Удельная теплоемкость измеряется количеством теплоты, необходимым для нагревания единицы массы вещества на один Кельвин, т.е.

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

Связь между удельной и молярной теплоемкостями

$$c = C/M.$$

Молярная теплоемкость идеального газа при постоянном объеме

$$C_V = iR/2.$$

Молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении

$$C_p = C_V + R = (i+2)\,R/2.$$

Внутренняя энергия идеального газа

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

При элементарном изменении объема газа совершается работа

$$dA = p\,dV.$$

В произвольном термодинамическом процессе

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

Работа идеального газа при изобарном процессе

$$A = p\,(V_2 - V_1).$$

Работа идеального газа при изотермическом процессе

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

Уравнение Пуассона для адиабатического процесса в идеальном газе

$$pV^{\gamma} = \text{const}, \qquad TV^{\gamma-1} = \text{const}, \qquad T^{\gamma}p^{1-\gamma} = \text{const},$$

где $\gamma = C_p/C_V$ – отношение молярных (или удельных) теплоемкостей газа при постоянных давлении и объеме.

Работа идеального газа при адиабатическом процессе выражается следующими формулами:

$$A = -\Delta U = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2),$$

$$A = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right].$$

Коэффициент полезного действия тепловой машины

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \le \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где A – работа, совершенная рабочим веществом в течение цикла, Q_1 – количество теплоты, полученное от нагревателя за это время рабочим веществом, Q_2 – количество теплоты, отданное им при этом холодильнику, T_1 и T_2 – наивысшая и наинизшая температуры рабочего вещества.

Знак равенства в формуле для η относится только к машине, работающей по циклу Карно.

Изменение энтропии тела в любом обратимом процессе, переводящем его из состояния A в состояние B, равно

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T},$$

где dQ – элементарное количество теплоты, полученное телом при температуре T.

Второе начало термодинамики: энтропия замкнутой системы при любых происходящих в ней процессах не уменьшается – она возрастает при необратимых процессах и остается постоянной в случае обратимых процессов, т.е

$$\Delta S \ge 0.$$

Примеры решения задач по статистической физике и термодинамике

Пример 1. Вычислить, какое число молекул кислорода содержится в сосуде объемом V = 1 л при нормальных условиях. Найти массу m кислорода в сосуде, а также массу m_o одной его молекулы. Чему равна внутренняя энергия U этого газа?

Решение: Молярная масса кислорода M=0,032 кг/моль, поэтому масса одной молекулы кислорода

$$m_o = \frac{M}{N_A},$$

где $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ – число Авогадро. Следовательно

$$m_o = \frac{0{,}032}{6{,}02 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = 5{,}32 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

Уравнение состояния идеального газа имеет вид

$$p = nkT, \qquad (1)$$

где при нормальных условиях давление $p = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па и температура $T = 273{,}15$ K; $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Поскольку концентрация молекул

$$n = \frac{N}{V}, \qquad (2)$$

где N – число молекул в объеме $V = 10^{-3}$ м^3, то из (1) и (2) следует, что

$$N = \frac{pV}{kT}.$$

Следовательно,

$$N = \frac{1{,}013 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}}{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 273{,}15} \cong 2{,}7 \cdot 10^{22} \text{ молекул.}$$

Масса газа равна массе всех его молекул, т.е.

$$m = Nm_o,$$

поэтому

$$m = 2{,}7 \cdot 5{,}32 \cdot 10^{-4}\ \text{кг} = 1{,}44\ \text{г}.$$

Внутренняя энергия заданной массы идеального газа равна

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

где $R = 8{,}31$ Дж/(моль·К) – молярная газовая постоянная; $i = 5$ – число степеней свободы жесткой двухатомной молекулы кислорода. В результате вычислений получаем

$$U = \frac{5 \cdot 1{,}44 \cdot 10^{-3} \cdot 8{,}31 \cdot 273{,}15}{2 \cdot 0{,}032}\ \text{Дж} = 255\ \text{Дж}.$$

Ответ: $N = 2{,}7 \cdot 10^{22}$; $m = 1{,}44$ г; $m_o = 5{,}32 \cdot 10^{-26}$ кг; $U = 255$ Дж.

Пример 2. Плотность кислорода в сосуде $\rho = 0{,}06$ кг/м^3, а среднеквадратичная скорость его молекул $\langle v_{кв} \rangle = 500$ м/с. Найти давление p, которое оказывает газ на стенки сосуда, а также температуру T газа и концентрацию n его молекул.

Решение: Согласно основному уравнению молекулярно-кинетической теории газов

$$p = \frac{1}{3} n m_o \langle v_{кв} \rangle^2, \qquad (1)$$

где m_o – масса молекулы кислорода. Учтем, что $\rho = nm_o$. С учетом, этого соотношения выражение (1) принимает вид:

$$p = \frac{1}{3}\rho \langle v_{кв} \rangle^2,$$

откуда получаем следующий результат:

$$p = \frac{1}{3}\, 0{,}06 \cdot 500^2\ \text{Па} = 5\ \text{кПа}.$$

Для среднеквадратичной скорости справедливо следующее соотношение:

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} , \qquad (2)$$

где $R = 8{,}31$ Дж/(моль·К) – молярная газовая постоянная, $M = 0{,}032$ кг/моль – молярная масса молекулярного кислорода. Возведем равенство (2) в квадрат и получим из него окончательное выражение

$$T = \frac{M \langle v_{кв} \rangle^2}{3R} .$$

В результате вычислений получаем

$$T = \frac{0{,}032 \cdot 25 \cdot 10^4}{3 \cdot 8{,}31} \text{ К} = 321 \text{ К} .$$

Давление газа связано с концентрацией его молекул следующим соотношением:

$$p = n\,k\,T,$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. С учетом этого соотношения

$$n = \frac{p}{kT} .$$

Вычисление приводит к итоговому результату:

$$n = \frac{5 \cdot 10^3}{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 321} = 1{,}13 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3} .$$

Ответ: $p = 5$ кПа; $T = 321$ К; $n = 1{,}13 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$.

Пример 3. В одном баллоне объемом $V_1 = 15$ л находится газ под давлением $p_1 = 0{,}2$ МПа, а в другом – тот же газ под давлением $p_2 = 1$ МПа. Баллоны, температура T которых одинакова, соединены тонкой короткой трубкой с краном. Если открыть кран, то в обоих баллонах устанавливается давление $p = 0{,}4$ МПа. Каков объем V_2 второго баллона?

Решение: Обозначим ν_1 – количество газа в первом баллоне, а ν_2 – количество газа во втором баллоне до открытия крана. Из уравнения состояния идеального газа

$$pV = \nu RT \tag{1}$$

следует, что значения ν_1 и ν_2 равны:

$$\nu_1 = \frac{p_1 V_1}{RT}, \qquad \nu_2 = \frac{p_2 V_2}{RT}. \tag{2}$$

После открытия крана общее количество вещества ν будет попрежнему равным

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{RT}, \tag{3}$$

а полный объем

$$V = V_1 + V_2. \tag{4}$$

При этом парциальные давления указанных порций газа станут согласно (1) равными

$$p_1' = \frac{\nu_1 RT}{V}, \qquad p_2' = \frac{\nu_2 RT}{V}. \tag{5}$$

Поскольку температура T остается неизменной, то для решения задачи мы можем воспользоваться законом Дальтона, согласно которому в соответствии с (2)–(5)

$$p = p_1' + p_2' = \frac{(\nu_1 + \nu_2)\,RT}{V} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}. \tag{6}$$

Заменив в равенстве (6) согласно с (4) $V_1 = V - V_2$, получаем равенство, из которого выражаем искомую величину, а именно

$$V_2 = V_1 \frac{p - p_1}{p_2 - p}.$$

После численных расчетов получаем:

$$V_2 = 0{,}015 \cdot \frac{4 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5}{10^6 - 4 \cdot 10^5} \text{м}^3 = 0{,}005 \text{м}^3 = 5\text{л}.$$

Ответ: $V_2 = 5$ л.

Пример 4. Определить среднюю кинетическую энергию поступательного и вращательного движения молекулы азота при температуре 1кК. Найти также полную кинетическую энергию $m = 2{,}8$ г азота при той же температуре.

Решение: Согласно закону Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул, кинетическая энергия поступательного движения молекулы определяется выражением

$$\langle \varepsilon_п \rangle = \frac{i_п}{2} kT,$$

а вращательного движения – аналогичным выражением

$$\langle \varepsilon_{вр} \rangle = \frac{i_{вр}}{2} kT,$$

где $i_п$ и $i_{вр}$ – соответственно число поступательных и вращательных степеней свободы молекул. Для жестких двухатомных молекул азота $i_п=3$ и $i_{вр}=2$, поэтому

$$\langle \varepsilon_п \rangle = \frac{3}{2} 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 10^3 \text{ Дж} = 2{,}07 \cdot 10^{-20} \text{ Дж},$$

$$\langle \varepsilon_{вр} \rangle = \frac{2}{2} 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 10^3 \text{ Дж} = 1{,}38 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}.$$

Полная кинетическая энергия всех молекул данной массы газа (внутренняя энергия идеального газа U) равна:

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

где $i = i_п + i_{вр} = 5$, а M=0,028 кг/моль – молярная масса молекулярного азота. С учетом этих значений получаем окончательный результат:

$$U = \frac{5}{2} \frac{2{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 8{,}31 \cdot 10^3}{0{,}028} \text{ Дж} = 2{,}08 \text{ кДж}.$$

Ответ: $\langle \varepsilon_п \rangle = 2{,}07 \cdot 10^{-20}$ Дж; $\langle \varepsilon_{вр} \rangle = 1{,}38 \cdot 10^{-20}$ Дж; $U = 2{,}08$ кДж.

Пример 5. Кислород массой $m = 10$ г находится под давлением $p_1 = 3 \cdot 10^5$ Па при температуре $T_1 = 283$ К. После нагревания при постоянном давлении газ занял объем $V_2 = 0{,}01$ м^3. Найти: 1) количество тепла Q, полученного газом; 2) энергию теплового движения молекул газа до и после нагревания; 3) работу газа в процессе нагревания. Нарисовать график процесса.

Решение: 1) Согласно уравнению Менделеева-Клапейрона для конечного состояния газа справедливо соотношение:

$$p_1 V_2 = \frac{m}{M} R T_2,$$

где $M = 0{,}032$ кг/моль – молярная масса молекулярного кислорода, а T_2 – температура газа в конечном состоянии. Отсюда

$$T_2 = \frac{p_1 V_2 M}{mR}. \qquad (1)$$

Поскольку молекулярный кислород является двухатомным газом, то для него число степеней свободы $i = 5$, поэтому его молярная теплоемкость при постоянном давлении равна

$$C_p = \frac{i+2}{2} R = \frac{7}{2} R, \qquad (2)$$

где $R = 8{,}31$ Дж/(моль·К) – молярная газовая постоянная. Тогда количество теплоты Q, полученное газом в этом процессе, будет задаваться соотношением:

$$Q = C_p \frac{m}{M} (T_2 - T_1).$$

С учетом выражений (1) и (2) последнее равенство можно привести к виду:

$$Q = \frac{7}{2M} (M p_1 V_2 - mRT_1),$$

откуда получаем

$$Q = \frac{7}{2 \cdot 0{,}032} (0{,}032 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 0{,}01 - 0{,}01 \cdot 8{,}31 \cdot 283) \text{ Дж} = 7{,}93 \text{ кДж}.$$

2) Энергия теплового движения молекул газа (внутренняя энергия газа) до и после нагревания соответственно равны

$$U_1 = \frac{i}{2} R \frac{m}{M} T_1, \qquad U_2 = \frac{i}{2} R \frac{m}{M} T_2 = \frac{i}{2} p_1 V_2.$$

В результате вычислений получаем:

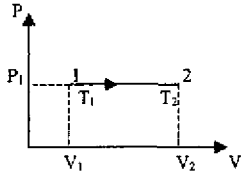
$$U_1 = \frac{5 \cdot 0{,}01}{2 \cdot 0{,}032} 8{,}31 \cdot 283 \text{ Дж} = 1{,}84 \text{ кДж},$$

$$U_2 = \frac{5}{2} 3 \cdot 10^5 \cdot 0{,}01 \text{ Дж} = 7{,}5 \text{ кДж}.$$

3) Согласно первому началу термодинамики работа газа $A = Q - \Delta Q = Q - (U_2 - U_1)$. Следуя этому правилу, получаем

$$A = 7{,}93 \cdot 10^5 - (7{,}5 - 1{,}84) \cdot 10^5 = 2{,}27 \text{ кДж}.$$

График процесса изображен на рисунке.



Ответ: 1) $Q = 7{,}93$ кДж; 2) $U_1 = 1{,}84$ кДж; $U_2 = 7{,}5$ кДж; 3) $A = 2{,}27$ кДж.

Пример 6. Найти удельную теплоемкость c_p для смеси, содержащей $\nu_1 = 2$ моль кислорода и $\nu_2 = 4$ моль азота.

Решение: Молярные массы кислорода и азота соответственно равны $M_1 = 0{,}032$ кг/моль и $M_2 = 0{,}028$ кг/моль. Кислород и азот являются двухатомными газами, поэтому их молекулы будут иметь одинаковое число степеней свободы $i = 5$, а потому и одинаковые молярные теплоемкости при постоянном давлении, которые равны

$$C_p = \frac{i+2}{2} R. \qquad (1)$$

Масса смеси $m = m_1 + m_2 = \nu_1 M_1 + \nu_2 M_2$. Используя определение удельной теплоемкости смеси при постоянном давлении, количество теплоты Q, полученное всей смесью при нагревании на ΔT, равно

$$Q = c_p m \,\Delta T. \qquad (2)$$

С другой стороны, это же количество теплоты равно сумме количеств теплот, полученных при нагревании каждым из газов смеси, т.е.

$$Q = Q_1 + Q_2 = \nu_1 C_p \,\Delta T + \nu_2 C_p \,\Delta T = (\nu_1 + \nu_2) C_p \,\Delta T. \qquad (3)$$

Сравнивая выражения (2) и (3), приходим к равенству

$$m c_p = (\nu_1 + \nu_2) C_p.$$

В итоге из последнего соотношения получаем искомое значение в виде:

$$c_p = \frac{(i+2)(\nu_1 + \nu_2) R}{2(\nu_1 M_1 + \nu_2 M_2)}.$$

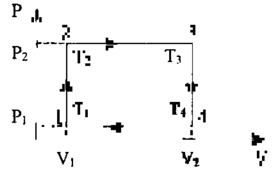
Подставив исходные значения, получаем

$$c_p = \frac{7 \cdot 6 \cdot 8{,}31}{2(2 \cdot 0{,}032 + 4 \cdot 0{,}028)} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 992 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Ответ: c_p = 992 Дж/(кг·К).

Пример 7. Воздух массой m = 1 кг совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар. Минимальные (начальные) значения объема и давления газа равны соответственно V_1 = 0,08 м^3 и p_1 = = 1,2 МПа. Максимальное давление газа в цикле равно p_2 = = 1,4 МПа, причем T_3 = 423 К. Определить: 1) координаты пересечения изохор и изобар; 2) работу A, совершенную газом за один цикл; 3) количество теплоты Q_1, полученное газом от нагревателя за цикл; 4) к.п.д. цикла. Считать воздух двухатомным газом, имеющим молярную массу M = 0,029 кг/моль. Построить график процесса

Решение: 1) Для двухатомных газов число степеней свободы $i = 5$. Количество вещества газа $\nu = m / M$. В нашем случае $\nu = 1/0{,}029$ моль $= 34{,}5$ моль. Согласно условию задачи $p_4 = p_1$ и $p_3 = p_2$. Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона для состояния 1:



$$p_1 V_1 = \nu R T_1,$$

откуда

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{\nu R}.$$

В результате

$$T_1 = \frac{1{,}2 \cdot 10^6 \cdot 0{,}08}{34{,}5 \cdot 8{,}31}\ \text{К} = 335\text{К}.$$

Для изохорного процесса $1 \to 2$ справедливо соотношение (закон Шарля):

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

откуда

$$T_2 = T_1 \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_2 V_1}{\nu R}.$$

Расчет дает

$$T_2 = \frac{1{,}4 \cdot 10^6 \cdot 0{,}08}{34{,}5 \cdot 8{,}31}\ \text{К} = 391\ \text{К}.$$

Для состояния 3 уравнение Менделеева-Клапейрона имеет вид:

$$p_2 V_2 = \nu R T_3,$$

из которого следует

$$V_2 = \frac{\nu R T_3}{p_2}.$$

После расчетов получаем

$$V_2 = \frac{34{,}5 \cdot 8{,}31 \cdot 423}{1{,}4 \cdot 10^6}\ м^3 = 0{,}0866\ м^3 = 86{,}6\ л\,.$$

Для изохорного процесса $3 \to 4$ выполняется равенство (закон Шарля):

$$\frac{p_3}{T_3} = \frac{p_4}{T_4},$$

откуда следует, что

$$T_4 = T_3 \frac{p_4}{p_3} = T_3 \frac{p_1}{p_2}.$$

Вычисления дают:

$$T_4 = 423 \cdot \frac{1{,}2 \cdot 10^6}{1{,}4 \cdot 10^6}\ К = 363\ К\,.$$

2) Для изохорных процессов $1 \to 2$ и $3 \to 4$ работа газа равна нулю, т.е. $A_{12} = A_{34} = 0$, поскольку для них $V = \text{const}$. Для изобарных процессов $2 \to 3$ и $4 \to 1$ работа газа соответственно равна:

$$A_{23} = p_2\,(V_2 - V_1) > 0, \qquad A_{41} = p_1\,(V_1 - V_2) < 0.$$

В итоге работа газа за цикл числено равна площади прямоугольника 1234, т.е.

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = (p_2 - p_1)(V_2 - V_1).$$

В результате расчета получаем:

$$A = 0{,}2 \cdot 10^6 (0{,}0866 - 0{,}08)\,Дж = 1{,}32\ кДж\,.$$

3) Количество теплоты Q_{12}, полученное газом при изохорном процессе $1 \to 2$, равно

$$Q_{12} = \nu C_v\,(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} R\nu\,(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} V_1\,(p_1 - p_2).$$

Вычисления приводят к результату:

$$Q_{12} = \frac{5}{2} \cdot 0{,}08 \cdot \left(1{,}4 \cdot 10^6 - 1{,}2 \cdot 10^6\right) Дж = 40\ кДж\,.$$

Количество теплоты Q_{23}, полученное газом при изобарном процессе $2 \to 3$, равно

$$Q_{23} = \nu C_p\left(T_3 - T_2\right) = \frac{i+2}{2}R\nu\left(T_3 - T_2\right) = \frac{i+2}{2}\left(\nu RT_3 - p_2V_1\right).$$

При расчете получаем

$$Q_{23} = \frac{7}{2}\cdot\left(34{,}5\cdot 8{,}31\cdot 423 - 1{,}4\cdot 10^6\cdot 0{,}08\right)\text{Дж} = 32{,}5\ \text{кДж}.$$

Для изохорного процесса $3 \to 4$ и изобарного процесса $4 \to 1$ соответственно получаем:

$$Q_{34} = \nu C_v\left(T_4 - T_3\right) < 0 \quad \text{и} \quad Q_{41} = \nu C_p\left(T_1 - T_4\right) < 0,$$

т.к. согласно нашим результатам $T_3 > T_2 > T_4 > T_1$. Очевидно, что

$$Q_{34} + Q_{41} = -Q_2,$$

где Q_2 – количество теплоты, отданное холодильнику за цикл ($Q_2 > 0$).

В итоге за цикл газ получает от нагревателя следующее количество теплоты:

$$Q_1 = Q_{12} + Q_{23},$$

т.е.

$$Q_1 = (40 + 32{,}5)\ \text{кДж} = 72{,}5\ \text{кДж}.$$

4) Термический к.п.д. η цикла по определению равен:

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

В результате для него получаем следующее численное значение:

$$\eta = \frac{1{,}32}{72{,}5} = 0{,}018 \quad \text{или} \quad \eta = 1{,}8\%.$$

Ответ: 1) $T_1 = 385$ К; $T_2 = 391$ К; $V_2 = 86{,}6$ л; $T_4 = 363$ К; 2) $A =$ $= 1{,}32$ кДж; 3) $Q_1 = 72{,}5$ кДж; 4) $\eta = 1{,}8\%$.

Пример 8. Найти теплопроводность K воздуха при давлении $p = 100$ кПа и температуре $T = 283$ К. Эффективный диаметр молекулы воздуха $d = 0{,}3$ нм. Считать воздух двухатомным газом, молярная масса которого $M = 0{,}029$ кг/моль.

Решение: Теплопроводность К воздуха определяется согласно следующему соотношению:

$$K = \frac{1}{3} c_v \rho \cdot \overline{v} \cdot \overline{\lambda},$$

где c_v – удельная теплоемкость воздуха, ρ – его плотность, $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость движения молекул воздуха, $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул воздуха.

Согласно соотношению

$$p = nkT$$

концентрация молекул воздуха равна

$$n = \frac{p}{kT}. \qquad (1)$$

С учетом этого равенства мы можем вычислить значение $\langle \lambda \rangle$, т.к.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}, \qquad (2)$$

где d – эффективный диаметр молекулы воздуха.

Плотность газа

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где m – масса газа, а V – его объем. Вычислим ее, используя уравнение Менделеева-Клапейрона следующего вида

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

из которого следует необходимое нам равенство

$$p = \frac{m}{V}\frac{RT}{M} = \rho\frac{RT}{M}$$

или

$$\rho = \frac{pM}{RT}. \qquad (3)$$

Удельная теплоемкость газа определяется соотношением

$$c_v = \frac{i}{2}\frac{R}{M}, \qquad (4)$$

где число степеней свободы молекул воздуха для двухатомных жестких молекул $i = 5$.

Средняя арифметическая скорость молекул воздуха вычисляется так:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \qquad (5)$$

С учетом приведенных соотношений (2)–(5) формула (1) принимает окончательный вид:

$$K = \frac{1}{3}\frac{i}{2}\frac{R}{M}\frac{pM}{RT}\sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}\frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} = \frac{ik}{3\pi d^2}\sqrt{\frac{RT}{\pi M}}.$$

Подставляя в последнее выражение численные значения, получаем:

$$K = \frac{5 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}}{3 \cdot 3{,}14 \cdot 9 \cdot 10^{-20}}\sqrt{\frac{8{,}31 \cdot 283}{3{,}14 \cdot 0{,}029}}\ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} = 13{,}1\ \frac{\text{мВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Ответ: K = 13,1 мВт/(м·К).

Контрольная работа № 2

201. В баллоне находится 10 г азота. Одна треть его молекул распалась на атомы. Определить полное число частиц, находящихся в баллоне, и вычислить молярные теплоемкости C_p и C_v этих частиц.

202. Какое число частиц содержится в 2 кг парообразного йода (I_2), степень диссоциации которого равна 0,5? Молярная масса молекулярного йода равна 254 г/моль.

203. Найти молярную массу воздуха, считая его смесью, состоящей из 76% азота, 23% кислорода и 1% аргона. Сколько молекул содержится в $1 м^3$ этой смеси при нормальных условиях?

204. Какое число молекул содержится в комнате объемом $80 м^3$ при температуре 17°С и давлении 100 кПа? Чему равна их концентрация?

205. В баллоне объемом 3 л находится кислород массой 4 г. Определить массу молекулы кислорода, количество вещества газа и концентрацию его молекул.

206. Плотность газа при давлении 0,2 МПа и температуре 7°С равна 2,41 $кг/м^3$. Какова молярная масса этого газа? Вычислить также концентрацию молекул газа и массу одной его молекулы.

207. В сосуде объемом 2,24 л находится кислород при нормальных условиях. Определить количество вещества, массу газа и концентрацию его молекул в сосуде.

208. Плотность некоторого газа равна $8{,}2 \cdot 10^{-5}$ $г/см^3$ при давлении 100 кПа и температуре 17°С. Найти молярную массу газа и среднеквадратичную скорость его молекул.

209. В сосуде находится смесь кислорода и водорода. Масса смеси равна 3,6 г. Массовая доля кислорода составляет 0,6. Найти молярную массу смеси. Определить полное количество вещества смеси, а также количество вещества каждого газа в отдельности.

210. В баллоне объемом 1 л находится азот при нормальных условиях. Когда азот нагрели до температуры 1,8 кК, то часть молекул азота оказалась диссоциированными (распавшимися) на атомы. Степень диссоциации $\alpha = 0{,}3$. Определить: 1) количество вещества ν_1 и концентрацию n_1 молекул азота до нагревания; 2) количество вещества ν_2 и концентрацию n_2 молекул молекулярного азота после нагревания; 3) количество вещества ν_3 и концентрацию n_3 атомов атомарного азота после нагревания; 4) полное количество вещества ν_4 и концентрацию n_4 частиц в сосуде после нагревания. Диссоциацией молекул азота при нормальных условиях пренебречь.

211. Колба объемом 4 л содержит некоторый газ массой 0,6 г под давлением 200 кПа. Определить среднеквадратичную скорость молекул газа.

212. Среднеквадратичная скорость молекул некоторого газа при температуре 27°С равна 500 м/с. Сколько молекул содержится в

10 г этого газа и чему равна кинетическая энергия их поступательного движения?

213. Определить плотность газа в колбе электрической лампы накаливания, если молекулы газа производят на стенку колбы давление 80 кПа, а средний квадрат скорости поступательного движения молекул газа равен $2{,}5 \cdot 10^5$ м^2/с^2.

214. Сколько молекул углекислого газа содержится в баллоне объемом 30 л при температуре 27°С и давлении 5 МПа? Чему равна их среднеквадратичная скорость и кинетическая энергия поступательного движения?

215. Найти число молекул водорода в единице объема сосуда при давлении 266,6 Па, если среднеквадратичная скорость его молекул равна 2,4 км/с.

216. Найти импульс молекулы водорода при температуре 20°С, считая скорость молекулы равной ее среднеквадратичной скорости.

217. Сколько молекул водорода находится в сосуде объемом 1 л, если среднеквадратичная скорость движения его молекул равна 500 м/с, а давление на стенки сосуда 1 кПа? Чему равна температура газа и концентрация его молекул?

218. Среднеквадратичная скорость молекул некоторого газа равна 450 м/с. Давление газа 50 кПа. Найти плотность газа при этих условиях.

219. Найти среднеквадратичную скорость молекул азота при температуре 27°С, а также среднюю кинетическую энергию поступательного и вращательного движения молекулы азота при той же температуре. Вычислить полную кинетическую энергию 100 г этого газа при тех же условиях.

220. Смесь гелия и аргона находится при температуре 1,2 кК. Определить среднеквадратичную скорость и среднюю кинетическую энергию этих атомов.

221. Закрытый сосуд объемом 2 л наполнен воздухом при нормальных условиях. В сосуд вводится диэтиловый эфир ($C_2H_5OC_2H_5$) при той же температуре. После того как весь эфир

испарился, давление в сосуде стало равным 0,14 МПа. Какая масса эфира была введена в сосуд?

222. Посередине откачанного и запаянного с обеих концов капилляра, расположенного горизонтально, находится столбик ртути длиной $l = 20$ см. Если капилляр поставить вертикально, то столбик ртути переместится на $\Delta l = 10$ см. До какого давления p_o был откачан капилляр, если его длина $L = 1$ м. Плотность ртути 13,6 г/см^3.

223. В баллоне объемом 10 л находится гелий под давлением 1 МПа и при температуре 27°С. После того как из баллона было взято 10 г гелия, температура в баллоне понизилась до 17°С. Определить давление гелия, оставшегося в баллоне.

224. Какой объем занимает смесь газов – азота массой 1 кг и гелия массой также 1 кг – при нормальных условиях? Чему равна молярная масса этой смеси и ее внутренняя энергия?

225. Котел объемом 20 л содержит углекислый газ массой 500 г под давлением 1,3 МПа. Определить температуру газа, его внутреннюю энергию и концентрацию его молекул при этих условиях.

226. В сосуде объемом 0,5 л находится 1 г парообразного йода (I_2). При температуре 1000°С давление в сосуде 93,3 кПа. Найти степень диссоциации α молекул йода на атомы, если молярная масса йода равна 254 г/моль. Вычислить также внутреннюю энергию газа.

227. Баллон объемом 12 л содержит углекислый газ. Давление газа равно 1 МПа, температура 27°С. Определить массу газа в баллоне. Вычислить число молекул в баллоне и их концентрацию, а также внутреннюю энергию газа.

228. В баллоне находилось 10 кг газа при давлении 10 МПа. Какую массу газа выпустили из баллона, если давление стало равным 2,5 МПа? Процесс выпуска газа считать изотермическим.

229. В сосуде находится 10 г углекислого газа и 15 г азота. Найти плотность и молярную массу смеси при температуре 27°С и давлении 150 кПа. Вычислить также полное число молекул в сосуде и внутреннюю энергию смеси при данных условиях.

230. Атмосферное давление возросло от 98,3 кПа до 100,3 кПа. Как изменилась при этом внутренняя энергия воздуха, содержащегося в комнате объемом 50 м^3? Температура в комнате предполагается неизменной. Воздух считать двухатомным газом.

231. Определить внутреннюю энергию 2 моль водорода, а также среднюю кинетическую энергию поступательного и вращательного движения одной молекулы этого газа при температуре 7°С.

232. Средняя кинетическая энергия вращательного движения молекулы кислорода в сосуде равна $5\cdot10^{-21}$ Дж, а кинетическая энергия поступательного движения всех молекул этого газа составляет 4,5 кДж. Вычислить температуру и количество кислорода в сосуде.

233. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы кислорода равна $7{,}25\cdot10^{21}$ Дж, а кинетическая энергия всех молекул этого газа в сосуде составляет 364 Дж. Вычислить температуру и массу газа в сосуде.

234. Средняя кинетическая энергия вращательного движения молекулы кислорода равна $3{,}96\cdot10^{-21}$ Дж, а кинетическая энергия вращательного движения всех молекул этого газа в сосуде составляет 477 Дж. Определить температуру и количество кислорода в сосуде, а также массу одной молекулы кислорода.

235. Найти полную кинетическую энергию 200 г аммиака (NH_3) при температуре 27°С, а также среднюю кинетическую энергию вращательного движения молекулы этого газа при тех же условиях.

236. Вычислить кинетическую энергию вращательного движения молекул, содержащихся в 440 г углекислого газа при температуре 80°С, и их полную кинетическую энергию. Определить также массу одной молекулы углекислого газа.

237. Внутренняя энергия 1 моль некоторого двухатомного газа равна 6 кДж. Вычислить среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы этого газа, считая его идеальным.

238. Вычислить кинетическую энергию поступательного и вращательного движения 200 г водорода при нормальных условиях.

239. Найти внутреннюю энергию 20 г кислорода при температуре 10°С. Какая энергия приходится на долю поступательного движения молекул этого газа, а какая – на долю вращательного движения. Вычислить также массу молекулы кислорода.

240. Найти полную кинетическую энергию всех молекул двухатомного газа, находящегося в сосуде объемом 2 л под давлением 150 кПа.

241. При изобарическом расширении двухатомного газа была совершена работа 156,8 Дж. Какое количество теплоты было сообщено газу?

242. При изотермическом расширении 2 кг азота при температуре 7 °С его объем увеличился в 2 раза. Определить работу, совершенную газом при расширении, изменение внутренней энергии и количество теплоты, полученное газом в этом процессе.

243. Двухатомному газу сообщено 2,093 кДж теплоты. Газ расширяется изобарически. Найти работу расширения газа и изменение его внутренней энергии.

244. Двухатомный идеальный газ расширяется изотермически от объема 100 л до объема 300 л. Конечное давление газа равно 200 кПа. Определить изменение внутренней энергии газа, совершенную им при этом работу и количество полученного газом тепла.

245. Работа изотермического расширения 10 г некоторого газа, в результате которого его объем удвоился, оказалась равной 575 Дж. Найти среднеквадратичную скорость молекул газа. Вычислить также кинетическую энергию поступательного движения всех молекул данного газа после расширения.

246. Определить количество теплоты, которое надо сообщить кислороду объемом 50 л при его изохорном нагревании, чтобы давление газа повысилось на 0,5 МПа.

247. Двухатомный газ, находящийся при давлении 2 МПа и температуре 27°С, сжимается адиабатически так, что его объем уменьшается в 2 раза. Найти температуру и давление газа после сжатия.

248. Некоторый газ совершает процесс, в ходе которого давление p изменяется с объемом V по закону: $p = p_0 \exp[-\alpha(V - V_0)]$ Па, где $p_0 = 600$ кПа, $\alpha = 0{,}2$ м$^{-3}$, $V_0 = 2$ м^3. Найти работу, совершаемую газом при расширении от $V_1 = 3$ м^3 до $V_2 = 4$ м^3.

249. Идеальный двухатомный газ, находящийся при температуре 0°С, подвергают двум независимым процедурам адиабатического сжатия. В результате первого сжатия объем газа уменьшается в 10 раз. В результате другого сжатия (при прежних начальных условиях) давление газа увеличивается в 10 раз. Определить температуру газа в результате каждого из этих двух процессов.

250 Кислород занимает объем $V_1 = 1$ м^3 и находится под давлением $p_1 = 200$ кПа. Газ нагрели сначала изобарно до объема $V_2 = 3$ м^3, а затем изохорно до давления $p_2 = 500$ кПа. Построить график процесса и найти: 1) изменение внутренней энергии газа; 2) совершенную им работу; 3) количество теплоты, переданное газу.

251. Объем аргона, находящегося при давлении 80 кПа, увеличивается от 1 л до 2 л. Найти изменение внутренней энергии газа в двух случаях: при изобарном и при адиабатическом расширении газа.

252. Определить молярную массу двухатомного газа и его удельные теплоемкости c_p и c_v, если известно, что разность последних равна 260 Дж/(кг·К). Вычислить также молярные теплоемкости этого газа C_p и C_v.

253. Трехатомный газ под давлением 240 кПа и температуре 20°С занимает объем 10 л. Определить теплоемкость этого газа при постоянном давлении и при постоянном объеме.

254. Определить показатель адиабаты идеального газа, который при температуре 77°С и давлении 0,4 МПа занимает объем 300 л и имеет теплоемкость при постоянном объеме 857 Дж/К. Найти также число степеней свободы молекул данного газа.

255. В закрытом сосуде объемом 2 л при нормальных условиях содержатся одинаковые массы азота и аргона. Какое количество

теплоты надо сообщить этой газовой смеси, чтобы нагреть ее на 100°С?

256. Определить удельную теплоемкость c_v смеси газов, содержащей 5 л водорода и 3 л гелия. Газы находятся при одинаковых условиях.

257. Определить показатель адиабаты частично диссоциировавшего на атомы азота, степень диссоциации которого $\alpha = 0,4$.

258. Кислород массой 2 кг занимает объем 1 м^3 и находится под давлением 0,2 МПа. Газ был нагрет сначала изобарно до объема 3 м^3, а затем изохорно до давления 0,5 МПа. Найти изменение внутренней энергии газа, совершенную им работу и количество теплоты, переданное газу.

259. Плотность некоторого двухатомного газа при нормальных условиях равна 1,43 кг/м^3. Найти удельные теплоемкости c_p и c_v этого газа. Определить также среднеквадратичную скорость молекул этого газа при тех же условиях.

260. Вычислить удельные теплоемкости газа c_p и c_v, зная, что его молярная масса равна 4 г/моль, а показатель адиабаты для него равен 1,67. Определить также молярные теплоемкости C_p и C_v данного газа.

261. Идеальный двухатомный газ, содержащий $\nu = 1$ моль вещества, совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар. Наименьший объем газа $V_{min} = 10$ л, наибольший $V_{max} = 20$ л; наименьшее давление газа $p_{min} = 246$ кПа, наибольшее $p_{max} = 410$ кПа. Построить график цикла. Определить: 1) температуру четырех характерных точек цикла; 2) количество теплоты, полученное газом от нагревателя за цикл; 3) работу газа за цикл; 4) количество теплоты, отданное холодильнику за цикл; 5) к.п.д. цикла.

262. Идеальный трехатомный газ совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар, причем наибольшее давление газа в 2 раза больше наименьшего, а наибольший объем в 4 раза больше наименьшего. Определить термический к.п.д. цикла. Построить график цикла.

263. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль и находящийся под давлением $p_1 = 0,1$ МПа при температуре 27°C, нагревают изохорно до давления $p_2 = 0,2$ МПа. После этого газ изотермически расширился до начального давления p_1 и затем изобарически был сжат до начального объема V_1. Построить график цикла. Определить температуру, давление и объем для характерных точек цикла. Найти: 1) количество теплоты, полученное газом от нагревателя за цикл; 2) количество теплоты, отданное газом холодильнику за цикл; 3) работу газа за цикл; 4) термический к.п.д. цикла.

264. Идеальный двухатомный газ совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар, причем наибольшее давление в 3 раза больше наименьшего, а наибольший объем в 5 раз больше наименьшего. Определить термический к.п.д. цикла. Построить график цикла.

265. Идеальный трехатомный газ, состоящий из жестких молекул, нагревают изохорно так, что его давление возрастает в 2 раза. После этого газ изотермически расширяется до начального давления, а затем изобарно сжимается до начального объема. Определить к.п.д. цикла. Нарисовать график процесса.

266. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Воздух (считать его двухатомным газом) при давлении $p_1 = 708$ кПа и температуре $t_1 = 127$°C занимает объем $V_1 = 2$ л. После изотермического расширения воздух занял объем $V_2 = 5$ л; после адиабатического расширения его объем стал равным $V_3 = 8$ л. Найти: 1) координаты пересечения изотерм и адиабат; 2) работу, совершаемую газом на каждом участке цикла; 3) полную работу, совершаемую газом за цикл; 4) к.п.д. цикла; 5) количество теплоты Q_1, полученное от нагревателя за один цикл; 6) количество теплоты Q_2, отданное холодильнику за цикл. Построить график цикла.

267. Одноатомный газ, содержащий количество рабочего вещества $\nu = 0,1$ кмоль, под давлением $p_1 = 100$ кПа занимал объем $V_1 = 5$ м^3. Газ сжимался изобарически до объема $V_2 = 1$ м^3, затем сжимался адиабатически и потом расширялся изотермически до на-

чального объема V_1 и давления p_1. Построить график процесса. Найти: 1) температуры T_1 и T_2, объем V_3 и давление p_3, соответствующие характерным точкам цикла; 2) количество теплоты Q_1, полученное от нагревателя за цикл; 3) количество теплоты Q_2, переданное газом холодильнику за цикл; 4) работу, совершенную газом за весь цикл; 5) термический к.п.д. цикла.

268. Наименьший объем двухатомного газа, совершающего цикл Карно, равен $V_1 = 153$ л. Определить наибольший объем V_3, если объемы в конце изотермического расширения и в конце изотермического сжатия соответственно равны $V_2 = 600$ л и $V_4 = 189$ л. Определить, во сколько раз максимальная за цикл температура больше минимальной, а также к.п.д. цикла. Вычислить, во сколько раз максимальное давление за цикл больше, чем давление в трех остальных характерных точках цикла. Построить график процесса.

269. Идеальный двухатомный газ совершает цикл Карно. Объем газа в конце изотермического расширения $V_2 = 12$ л, а в конце адиабатического расширения этот объем $V_3 = 16$ л. Найти отношение температуры нагревателя к температуре холодильника и к.п.д. цикла. Нарисовать график процесса.

270. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится под давлением $p_1 = 250$ кПа и занимает объем $V_1 = 10$ л. Сначала газ изохорически нагревают до температуры $T_2 = 400$ К. Далее, изобарически расширяя, доводят его до первоначального давления p_1. После этого путем изобарического сжатия возвращают газ в начальное состояние. Определить температуру характерных точек цикла и его термический к.п.д. Построить график процесса.

271. Найти среднюю продолжительность свободного пробега молекул кислорода при температуре –23°С и давлении 100 кПа. Считать эффективный диаметр молекулы кислорода равным 0,27 нм.

272. Определить среднюю длину свободного пробега и число соударений за 1 с, проходящих между всеми молекулами водорода, находящимися в сосуде объемом 1 л при температуре 27°С и дав-

лении 10 кПа. Считать эффективный диаметр молекулы водорода равным 0,23 нм.

273. Найти массу азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку 100 см^2 за время 10 с, если градиент плотности в направлении, перпендикулярном к площадке, равен 1,26 кг/м^4. Температура азота 27°С, давление 1,036 кПа. Диаметр молекулы азота считать равным 0,3 нм.

274. Определить диффузию и динамическую вязкость гелия, находящегося при температуре –73°С и давлении 10 кПа. Считать эффективный диаметр молекулы гелия равным 0,19 нм.

275. Найти динамическую вязкость воздуха при температуре 100°С и нормальном давлении, если при нормальных условиях она равна 17,2 мкПа·с.

276. При каком давлении отношение динамической вязкости некоторого газа к его диффузии равно 0,3 кг/м^3, а среднеквадратичная скорость его молекул равна 632 м/с?

277. Какое количество теплоты теряет помещение за 1 час через окно за счет теплопроводности воздуха, заключенного между двумя рамами? Площадь каждой рамы 4 м^2, расстояние между ними 30 см. Температура помещения 18°С, температура наружного воздуха –20°С. Диаметр молекул воздуха 0,3 нм. Температуру воздуха между рамами считать равной среднему арифметическому температур помещения и наружного воздуха. Давление 101,3 кПа. Считать воздух двухатомным газом, имеющим молярную массу 29 г/моль.

278. В воздушном пространстве между пластинами, находящимися на расстоянии 1 мм друг от друга, поддерживается разность температур $\Delta T = 1$ К. Площадь каждой пластины 100 см^2. Какое количество теплоты передается за счет теплопроводности от одной пластины к другой за 10 мин при нормальных условиях? Диаметр молекулы воздуха 0,3 нм. Считать воздух двухатомным газом, имеющим молярную массу 29 г/моль.

279. При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул кислорода равна 125 см, если температура газа 47°С? Эф-

фективный диаметр молекулы кислорода 0,27 нм. Чему равна теплопроводность кислорода при таких условиях?

280. Динамическая вязкость кислорода при нормальных условиях равна 19,2 мкПа·с. Какова средняя длина свободного пробега молекул кислорода и их эффективный диаметр при этих условиях?

Информационно-методическое обеспечение

Основная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1, 2 – М.: Наука, 1977-2002.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2001-2002.
3. Наркевич И.И., Волмянский Э.И., Лобко С.И. Физика для втузов. Т. 1. – Мн.: Вышэйшая школа, 1992.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1985-1990.
5. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т. !– М.: Наука, 1972-1974; Киев: Днiпро, 1994.
6. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. – М.: Высшая школа, 1981-1988.
7. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1973-1990; СПб: Спец. лит., Лань, 1999.
8. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики. – М.: Высшая школа, 1994-1996.

Дополнительная литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. – М.: Наука, 1977-1990.
2. Матвеев А.Н. Курс общей физики. Т. 1, 2.– М.: Высшая школа, 1976-1989.
3. Астахов А.В., Широков Ю.М. Курс физики. Т. 1. – М.: Наука, 1977-1981.
4. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике. – М.: Наука, 1982.
5. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. – М.: Наука, 1987.

Содержание

Учебное издание

Кужир Павел Григорьевич
Самойлюкович Владимир Александрович
Тесевич Борис Иванович

ФИЗИКА

Часть 1: Механика, статистическая физика и термодинамика. Контрольные задания и учебные материалы

Учебно-методическое пособие для студентов-заочников строительного и горно-механического профилей

В авторской редакции
Ответственный за выпуск А.П.Аношко

Подписано в печать 22.11.2002.
Формат 60 × 84 1/16
Усл. печ. л. 4,5. Тир. 600 экз. Зак. 1213.

Отпечатано в типографии УП «Технопринт»
с оригинал-макета заказчика
Лицензия ЛП № 203 от 26.01.1998 г.
220027, Минск, пр. Ф.Скорины, 65, к. 14, оф. 209.
Тел./факс 231-86-93