

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Международный институт дистанционного образования

МЕХАНИКА, СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания, контрольные задания
и учебные материалы для студентов МИДО

Минск
БНТУ
2011

УДК 530.1(075.8)
ББК 22.3я7
М 55

С о с т а в и т е л ь *О.А. Бояринова*

Р е ц е н з е н т ы:
И.А. Сатиков, А.А. Иванов

Издание содержит учебные материалы, задачи контрольной работы и для самостоятельной подготовки студентов по курсу «Механика, статистическая физика и термодинамика». Приведена рабочая программа по соответствующим разделам физики, сформулированы методические указания по выполнению и оформлению контрольных работ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Издание представляет собой комплекс учебных материалов, необходимых для успешного освоения физики студентами технического вуза дистанционной формы обучения. В нем представлена часть рабочей программы, которая содержит вопросы, изучаемые в первом семестре обучения физике; требования к оформлению контрольной работы, предусмотренной учебным планом; задачи, включенные в контрольную работу, а также ряд задач для самоподготовки студентами. Все задачи разбиты на тематические блоки, которые сопровождаются краткими теоретическими сведениями, достаточными для того, чтобы студенты смогли самостоятельно решать задачи своего варианта.

Задачи, включенные в контрольную работу, разбиты на десять вариантов, в каждом варианте восемь задач. Номер варианта, который должен выполнить студент совпадает с последней цифрой номера зачетной книжки студента. Задачи контрольной работы составлены таким образом, чтобы охватить максимальное количество вопросов, изучаемых в данном курсе физики. Задачи, не включенные в контрольную работу, а также задачи других вариантов дополняют друг друга и будут способствовать более глубокому пониманию изучаемых явлений и законов, а также развитию логического мышления.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА КУРСА ФИЗИКИ

Механика

Физические основы механики

Предмет физики. Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Роль физики в развитии техники и влияние техники на развитие физики. Современные компьютерные технологии и применение компьютерного моделирования в изучение физики. Задачи курса физики. Общая структура курса. Системы единиц физических величин.

Предмет механики. Пространство и время в классической механике. Нерелятивистская и релятивистская механика. Квантовая и классическая механика.

Кинематика, динамика, статика. Материальная точка, система материальных точек, абсолютно твердое тело, сплошная среда. Число степеней свободы механической системы.

Кинематика

Система отсчета. Кинематика материальной точки. Перемещение, путь, траектория. Скорость и ускорение. Вычисление пройденного пути. Тангенциальное и нормальное ускорение. Поступательное движение твердого тела.

Кинематика вращательного движения твердого тела. Угловая скорость и угловое ускорение. Связь между угловыми и линейными кинематическими характеристиками.

Динамика материальной точки

Основная задача динамики. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета. Принцип относительности Галилея. Масса, сила, импульс. Второй закон Ньютона. Импульс силы. Третий закон Ньютона. Инвариантность уравнений движения относительно преобразований Галилея. Силы трения. Упругие силы. Закон всемирного тяготения. Сила тяжести и вес. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции. Второй закон Ньютона для неинерциальных систем отсчета.

Законы сохранения в механике

Внутренние и внешние силы. Импульс системы. Закон сохранения импульса. Центр инерции (центр масс) механической системы. Уравнение движения центра инерции. Реактивное движение. Урав-

нение движения тела переменной массы. Энергия, работа и мощность. Коэффициент полезного действия. Кинетическая энергия. Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия частицы в силовом поле. Механическая энергия системы. Закон сохранения механической энергии. Закон сохранения полной энергии системы. Законы сохранения и свойства симметрии пространства-времени. Удар абсолютно упругих и неупругих твердых тел.

Динамика твердого тела

Момент инерции материальной точки и твердого тела относительно неподвижной оси. Главные оси и главные моменты инерции твердого тела. Моменты инерции некоторых тел регулярной формы. Теорема Штейнера. Момент силы относительно точки и оси. Уравнение движения твердого тела, вращающегося относительно неподвижной оси. Момент импульса относительно точки и относительно оси. Закон сохранения момента импульса и его связь со свойством изотропности пространства. Кинетическая энергия вращения твердого тела. Работа и мощность внешних сил при вращении твердого тела. Свободные оси. Гироскоп.

Механика сплошных сред

Общие свойства жидкостей и газов. Идеальная жидкость. Кинематическое описание движения жидкости. Уравнение неразрывности и уравнение Бернулли. Вязкость. Силы внутреннего трения. Динамический и кинематический коэффициент вязкости. Ламинарное и турбулентное течение жидкостей. Метод Стокса и метод Пуазейля определения коэффициента вязкости. Движение тел в жидкостях и газах.

Механические колебания

Общие сведения о колебаниях. Механические гармонические колебания и их характеристики: амплитуда, фаза, период, круговая частота, начальная фаза, скорость и ускорение при механических колебаниях. Энергия гармонических колебаний. Дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний. Гармонический осциллятор. Энергия гармонического осциллятора. Пружинный, физический и математический маятники. Сложение гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты. Биения. Понятие о представлении сложных периодических колебаний в виде разложе-

ния в ряд Фурье по гармоническим колебаниям. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу. Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний и его решение. Коэффициент затухания, декремент затухания, логарифмический декремент затухания, добротность. Аперiodический процесс. Автоколебания. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его общее решение. Установившиеся вынужденные колебания. Резонанс. Резонансные кривые. Понятие об ангармонических колебаниях.

Упругие волны

Волновые процессы. Механизм образования волн в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Плоские, цилиндрические и сферические волны. Упругие волны в газах, жидкостях и твердых телах. Уравнение плоской волны. Длина волны, волновое число, фаза плоской волны. Фронт волны и волновая поверхность. Фазовая скорость. Волновое уравнение. Суперпозиция волн. Групповая скорость. Волновой пакет. Энергия упругой волны. Плотность потока энергии. Вектор Умова. Когерентность волн. Интерференция волн. Стоячие волны. Уравнение стоячей волны и его анализ. Звуковые волны. Характеристики звука. Эффект Доплера в акустике. Применение ультразвука.

Специальная теория относительности

Постулаты специальной теории относительности. Понятие события. Преобразования Лоренца и требования релятивистской инвариантности. Релятивистский закон сложения скоростей. Относительность одновременности. Релятивистские изменения интервала времени и интервала длины. Импульс и энергия релятивистской частицы. Взаимосвязь энергии, импульса и массы. Энергия покоя. Основной закон релятивистской динамики материальной частицы.

Основы молекулярной физики и термодинамики

Статистический и термодинамический методы исследования. Макроскопическое состояние. Макроскопические параметры как средние значения. Термодинамические системы и параметры. Тепловое равновесие. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные процессы.

Молекулярно-кинетическая теория газов

Идеальный газ. Законы идеального газа. Смесь идеальных газов. Закон Дальтона. Уравнение Менделеева-Клапейрона. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул. Молекулярно-кинетический смысл температуры.

Микроскопические параметры. Вероятность флуктуации. Понятие функции распределения случайной величины. Функция распределения Максвелла молекул идеального газа по скоростям и энергиям теплового движения. Характерные скорости теплового движения молекул газа. Барометрическая формула. Распределение Больцмана молекул идеального газа по координатам во внешнем потенциальном поле.

Явления переноса в термодинамически неравновесных системах

Понятие о физической кинетике. Среднее число столкновений и средняя длина пробега молекул. Время релаксации. Явления переноса. Опытные законы теплопроводности, диффузии и внутреннего трения (вязкости) и их объяснение с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Понятие вакуума.

Термодинамика

Число степеней свободы молекулы. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Границы применимости закона о равномерном распределении энергии и понятие о квантовании энергии вращения и колебания молекул. Внутренняя энергия идеального газа. Работа газа при изменении объема. Количество теплоты. Теплоемкость. Уравнение Майера. Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам. Адиабатный процесс. Понятие политропного процесса.

Обратимые и необратимые процессы. Круговой процесс. Энтропия. Энтропия идеального газа. Статистическое толкование энтропии. Принцип возрастания энтропии. Второе начало термодинамики. Теорема Нернста. Тепловые двигатели и холодильные машины. Цикл Карно. Максимальный коэффициент полезного действия тепловой машины.

Реальные газы

Силы и потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия. Реальные газы. Эффективный диаметр молекулы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Критическое состояние и параметры критического состояния. Давление насыщенного пара. Метастабильные состояния. Внутренняя энергия реального газа. Эффект Джоуля-Томсона для реального газа. Понятие энтальпии. Температура инверсии. Сжижение газов.

Жидкости

Строение и свойства жидкостей. Поверхностное натяжение. Поверхностно-активные вещества. Смачивание. Давление под изогнутой поверхностью жидкости. Формула Лапласа. Капиллярные явления. Мениск. Формула для высоты подъема жидкости в капилляре.

Кристаллическое состояние

Твердые тела. Строение кристаллов. Моно- и поликристаллы. Типы кристаллических решеток. Ионные, атомные, металлические и молекулярные кристаллы. Дефекты кристаллической решетки: вакансии, примеси внедрения, примеси замещения. Краевые и винтовые дислокации. Закон Дюлонга-Пти теплоемкости твердых тел и границы его применимости. Жидкие кристаллы.

Фазовые переходы

Фазы состояния вещества. Условия равновесия фаз. Фазовые переходы первого рода. Диаграммы состояний. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Критическая точка. Трехфазная система «твердое тело – жидкость – газ». Тройная точка. Фазовые переходы второго рода. Сверхтекучесть жидкого гелия.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом по курсу физики, студент дистанционной формы обучения должен выполнить ряд контрольных работ, первая из которых охватывает следующие разделы физики: «Механика», «Статистическая физика и термодинамика». 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. Контрольная работа может быть выполнена как рукописно в тетради, так и набрана в электронном виде с последующей распечаткой.
3. Контрольную работу следует выполнять аккуратно, оформляя каждую задачу с новой страницы.
4. Условия задач своего варианта следует переписывать полностью, а заданные физические величины выписывать отдельно; при этом все численные величины должны быть представлены в одной системе единиц (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, надо приводить ее вывод.
9. Решение задачи рекомендуется сначала сделать в общем виде (в буквенных обозначениях), давая при этом необходимые пояснения.
10. Вычисления следует проводить путем подстановки заданных числовых значений в расчетную формулу.
11. В конце решения следует 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, руководствуясь правилами округления физических величин.

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.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

Белорусский национальный технический университет
Международный институт дистанционного образования
Кафедра «Информационные системы и технологии»

Контрольная работа по дисциплине «Физика»
за ___ семестр
Вариант _____

Выполнил:
студент _ курса, группы _____
ФИО _____
дом. адрес _____
Проверил:
ФИО преподавателя _____

Минск 20__

ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Таблица 1

<i>Варианты</i>	<i>Номера задач</i>							
1	101	120	131	146	156	206	225	246
2	102	121	135	147	157	207	226	248
3	103	122	136	148	158	208	227	250
4	104	123	137	150	159	209	228	251
5	105	124	138	151	160	210	229	252
6	106	125	140	154	161	201	230	256
7	107	126	141	155	162	202	232	257
8	108	127	142	156	164	203	234	259
9	109	128	143	157	165	204	235	261
0	110	130	144	158	166	205	236	262

ЗАДАЧИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ И ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Кинематика

Перемещение $\Delta \vec{r}$ это направленный отрезок прямой соединяющий начальное и конечное положения тела (материальной точки).

Скорость тела

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt},$$

ускорение тела

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}.$$

Скорость и перемещение тела, при равнопеременном движении по прямой линии, связаны соотношениями:

$$v = v_0 + at, \quad \Delta r = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad v^2 - v_0^2 = 2a\Delta r,$$

где v_0 – начальная скорость.

При криволинейном движении

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \quad a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2},$$

где a_n – нормальное ускорение тела (центростремительное); a_τ – тангенсальное ускорение; a – полное ускорение тела; R – радиус кривизны траектории тела.

Вращательное движение твердого тела характеризуется *угловой скоростью* и *угловым ускорением*

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}, \quad \varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2 \varphi}{dt^2}.$$

При движении по окружности с постоянной угловой скоростью

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega t,$$

при движении по окружности с постоянным угловым ускорением

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t, \quad \varphi(t) = \varphi_0 + \omega t + \frac{\varepsilon t^2}{2}.$$

Связь между линейными и угловыми величинами, описывающими движение точек вращающегося тела:

$$\vec{v} = [\vec{\omega} \vec{R}], \quad \vec{a}_\tau = [\vec{\varepsilon} \vec{R}],$$

при движении по окружности примет вид

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

101. Два велосипедиста выехали из пункта A в пункт C одновременно. Скорость первого велосипедиста $v_1 = 45 \text{ км/ч}$, а скорость второго $v_2 = 10 \text{ м/с}$. Во время движения первый велосипедист был вынужден остановиться в пункте B , расположенном на расстоянии $S_{AB} = 90 \text{ км}$ от пункта A , на $t = 60 \text{ мин}$. С какой минимальной скоростью должен двигаться первый велосипедист на оставшемся участке пути, чтобы приехать в пункт C первым, если все расстояние между пунктами A и C равно $S_{AC} = 216 \text{ км}$?

102. Скорость катера относительно воды $v = 12 \text{ м/с}$, скорость течения реки $u = 4 \text{ м/с}$. Во время движения катера против течения, с него упал в воду спасательный круг. Когда обнаружили, что спасательный круг потерян, катер двигался против течения уже $t = 15 \text{ мин}$. Сколько времени потребуется катеру, чтобы догнать спасательный круг?

103. С какой скоростью автомобиль удаляется от велосипедиста, если они пересекли перекресток одновременно. Скорость автомобиля $v_1 = 60 \text{ км/ч}$, а скорость велосипедиста $v_2 = 30 \text{ км/ч}$. Угол, образованный дорогами, $\alpha = 45^\circ$.

104. Навстречу друг другу из пункта A и пункта B выехали пассажирский и товарный поезда. Скорость пассажирского поезда, выехавшего из пункта A , равна $v_1 = 120 \text{ км/ч}$, а скорость товар-

ного поезда $v_2 = 90 \text{ км/ч}$. Расстояние между пунктами $S = 420 \text{ км}$. Через сколько времени и на каком расстоянии от пункта A встретятся поезда?

105. Из-за ремонтных работ на железнодорожном полотне, поезд вынужден первую треть своего пути двигаться со скоростью $v_1 = 85 \text{ км/ч}$, а вторую половину пути со скоростью $v_3 = 100 \text{ км/ч}$. С какой скоростью v_2 должен двигаться поезд оставшийся промежуток пути, чтобы преодолеть расстояние $S = 450 \text{ км}$, за $t = 4,5 \text{ часа}$, чтобы не опоздать на станцию назначения?

106. Уравнение движения материальной точки имеет вид: $x = A + Bt + Dt^3$, где $A = 2 \text{ м}$, $B = 3 \text{ м/с}$, $D = -1 \text{ м/с}^3$. Найти скорость и ускорение материальной точки в момент времени $t_1 = 0 \text{ с}$ и $t_2 = 0,5 \text{ с}$. Вернется ли материальная точка в первоначальное положение, если вернется, то в какой момент времени? Построить график зависимости абсолютного значения скорости от времени за первые три секунды движения.

107. Уравнение движения материальной точки имеет вид: $x = Bt + Ct^2 + Dt^3$, где $B = 2 \text{ м/с}$, $C = -3 \text{ м/с}^2$, $D = 1 \text{ м/с}^3$. Найти скорость и ускорение материальной точки в момент времени $t_1 = 0 \text{ с}$ и $t_2 = 4 \text{ с}$. В какой момент времени вектор скорости меняет свое направление; пояснить, как изменяет свое движение материальная точка? Построить график зависимости координаты материальной точки от времени за первые $2,5 \text{ с}$ движения. Найти перемещение материальной точки за две секунды движения.

108. Уравнение движения тела имеет вид: $x = A + Ct^2 + Dt^3$, где $A = 4 \text{ м}$, $C = 2 \text{ м/с}^2$, $D = -0,5 \text{ м/с}^3$. В какой момент времени тело остановится? Найти среднюю скорость, среднее ускорение и перемещение за этот промежуток времени.

109. Автомобиль, двигаясь равнозамедленно уменьшил свою скорость с $v_1 = 60 \text{ км/ч}$ до $v_2 = 15 \text{ км/ч}$ за $t = 5 \text{ с}$. Найти ускорение с которым двигается автомобиль, путь пройденный автомобилем за 1-ю и 5-ю секунды движения.

110. Найти тормозной путь автомобиля, если он двигался со скоростью $v = 90 \text{ км/ч}$, а время торможения $t = 7 \text{ с}$.

111. Тело изменяет свое положение в пространстве согласно закону, изображенному на рис. 1. Найти: перемещение и пройденный путь за первые $\Delta t = 7,0$ с движения; скорость и ускорение тела в момент времени $t_1 = 3,5$ с; скорость тела в момент времени $t_2 = 7,0$ с.

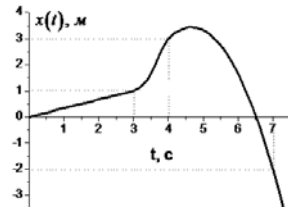


Рисунок 1

112. Тело изменяет свое положение в пространстве согласно закону, изображенному на рис. 1. Построить график зависимости скорости от времени $v(t)$. Найти среднюю скорость тела за первые $\Delta t = 4$ с движения.

113. Материальная точка изменяет свое положение в пространстве с течением времени, по закону, изображенному на рис. 2. Найти среднюю скорость и среднее ускорение с которыми материальная точка двигалась вплоть до момента остановки. Построить график зависимости скорости материальной точки от времени $v(t)$.

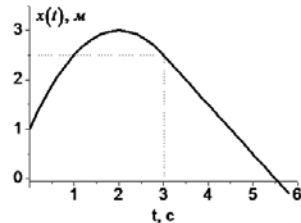


Рисунок 2

114. Тело начинает двигаться вдоль прямой без начальной скорости с постоянным ускорением. Через $t_1 = 12$ мин ускорение тела меняется по направлению, оставаясь таким же по модулю. Через какое время t_2 от начала движения тело вернется в исходную точку?

115. С наклонной горы начал скатываться вагон, ускорение которого $a = 0,5 \text{ м/с}^2$. Через $t = 3$ мин за ним последовал второй вагон, ускорение которого также $0,5 \text{ м/с}^2$, однако начальная скорость $v = 5 \text{ м/с}$. Через какое время после начала движения первого вагона, второй вагон догонит первый. Какой путь будет пройден первым вагоном к этому моменту времени и какова будет его скорость. Длина вагона $l = 25$ м.

116. С крыши падают одна за другой две капли. Через время $t = 2,0$ с после начала падения второй капли расстояние между каплями стало равным $S = 25$ м. На сколько раньше первая капля оторвалась от крыши?

117. С высоты $h_1 = 10$ м без начальной скорости падает камень. Через время $t = 0,2$ с за ним брошен второй камень. С какой начальной скоростью v_0 брошен второй камень, если он догнал первый камень на высоте $h = 1$ м над землей?

118. Тело брошено горизонтально с начальной скоростью $v = 15,5$ м/с с башни высотой $h = 19,6$ м. Найти скорость, нормальное и тангенсальное ускорение тела, радиус кривизны траектории движения тела, угловую скорость и угловое ускорение в момент удара тела о землю.

119. Одновременно из одной точки были брошены два мяча. Первый мяч бросили под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту, со скоростью $v_1 = 15$ м/с. Второй мяч бросили под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту. С какой скоростью бросили второй мяч, если оба мяча упали в одной точке друг за другом, причем первый мяч на $t = 1,28$ с позже второго?

120. Из одной точки одновременно бросают с одинаковыми скоростями $v = 20$ м/с два тела: одно вертикально вверх, второе горизонтально. Найти расстояние между телами через $t = 2$ с после бросания. Сопротивлением воздуха пренебречь.

121. Тело, брошенное под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту, через время $t = 4$ с после начала движения имело вертикальную проекцию скорости $v_y = 9,8$ м/с. Найти расстояние S между местом бросания и местом падения, тангенсальную и нормальную составляющую ускорения через $t = 6$ с после начала движения.

122. Диск радиусом $R = 10$ см вращается согласно уравнению $\varphi = A + Bt^2 + Ct^3$, где $A = 3$ рад, $B = -2$ рад/с², $C = 0,1$ рад/с³. Найти тангенциальное, нормальное и полное ускорения точек на окружности диска в конце второй секунды после начала вращения.

123. Диск радиусом $R = 2$ см вращается согласно уравнению $\varphi = Bt + Ct^3$, где $B = 1,2$ рад/с, $C = -0,1$ рад/с³. Найти тангенциальное, нормальное и полное ускорения точек на окружности диска в конце десятой секунды после начала вращения. В какой момент времени диск остановится?

124. Колесо автомашины, вращаясь равномерно, при торможении уменьшило свою частоту за $t = 30$ с с $\nu_1 = 360$ об / мин до $\nu_2 = 120$ об / мин . Найти угловое ускорение колеса и число оборотов, сделанное им за это время.

125. Диск начинает вращаться равноускоренно с ускорением $\varepsilon_1 = 2$ рад / с², через $t = 2$ мин после начала движения диск начинает двигаться равномерно с ускорением $\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1}{2}$. Найти время которое пройдет до остановки диска, число оборотов, сделанное диском за все время движения, период обращения диска в момент времени $t = 20$ с .

126. Точка движется по окружности радиусом $R = 30$ см с постоянным угловым ускорением. Определить тангенциальное ускорение точки, если известно, что за время $t = 4$ с она совершила три оборота и в конце третьего оборота ее нормальное ускорение равно $a_n = 2,7$ м/с².

127. Найти нормальное ускорение точек земной поверхности, вызванное суточным вращением Земли. Найти значение проекции этого ускорения на направление земного радиуса в данной точке. Оценить значение искомых величин для широты Минска ($53,91^\circ$ северной широты). Радиус Земли $R = 6400$ км .

128. Автомобиль движется со скоростью $v = 60$ км/ч . Сколько оборотов в секунду делают его колеса, если они катятся по шоссе без скольжения, а внешний диаметр покрышек колес равен $d = 60$ см .

Динамика поступательного движения

Основное уравнение динамики (второй закон Ньютона) материальной точки для тела постоянной массы m в инерциальных системах отсчета имеет вид

$$\vec{F} = m\vec{a} ,$$

где \vec{F} – равнодействующая приложенных к телу сил.

Работа силы \vec{F} при перемещении $\Delta\vec{r}$ может быть выражена формулой

$$A = \int F_r dr .$$

Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , равна

$$W_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Закон сохранения импульса: в изолированной системе, импульс входящих в нее тел остается постоянным с течением времени

$$\sum_{i=1}^N m_i \vec{v}_i = \text{const} \vec{t}.$$

Закон всемирного тяготения: две материальные точки притягиваются друг к другу с силой прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними

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

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$.

129. Скорость лифта при подъеме изменяется в соответствии с графиком представленном на рис. 3. Масса кабины лифта с пассажирами $m = 1500 \text{ кг}$. Найдите силу T натяжения каната, удерживающего кабину лифта в начале, середине и конце подъема.

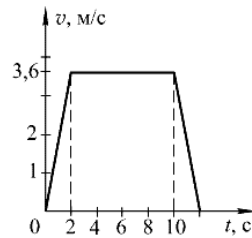


Рисунок 3

130. Веревка выдерживает груз массы $m_1 = 110 \text{ кг}$ при подъеме его с некоторым ускорением, направленным по вертикали, и груз массы $m_2 = 690 \text{ кг}$ при опускании его с таким же по величине ускорением. Какова максимальная масса m груза, который можно поднимать на этой веревке, перемещая его с постоянной скоростью?

131. Строительный кран поднимает груз массой $m = 520 \text{ кг}$. С каким ускорением a можно производить подъем, если стальные тро-

сы крана рассчитаны на силу натяжения $T = 12 \text{ кН}$. Какой груз можно будет поднять, если уменьшить ускорение вдвое?

132. Тело массы $m = 20 \text{ кг}$ тянут с силой $F = 120 \text{ Н}$ по горизонтальной поверхности. Если эта сила приложена под углом $\alpha_1 = 60^\circ$ к горизонту, то тело движется равномерно. С каким ускорением a будет двигаться тело, если ту же силу приложить под углом $\alpha_2 = 30^\circ$ к горизонту?

133. Через реку ширины $d = 100 \text{ м}$ переброшен выпуклый мост в форме дуги окружности. Верхняя точка моста поднимается над берегом на высоту $h = 10 \text{ м}$. Мост может выдержать максимальную силу давления $F = 44 \text{ кН}$. При какой скорости автомобиль массы $m = 5000 \text{ кг}$ может проехать через такой мост?

134. Диск совершает семьдесят оборотов в минуту. Где можно положить на диск тело, чтобы оно не соскользнуло? Коэффициент трения покоя тела о диск $\mu_{\text{пок}} = 0,44$.

135. На столе стоит тележка массой $m_1 = 5 \text{ кг}$. К тележке привязан один конец шнура, перекинутого через блок. К другому концу шнура привязана гиля массой m_2 . Найти массу гири, если известно, что система движется с ускорением $a = 1,2 \text{ м/с}^2$. Трение не учитывать.

136. Две гири массами $m_1 = 3 \text{ кг}$ и $m_2 = 2 \text{ кг}$ соединены гибкой нерастяжимой нитью перекинутой через неподвижный блок, вращающийся без трения. С каким ускорением будут двигаться грузы? Чему равна сила натяжения нити? Массой блока и нити пренебречь.

137. Конструкция механической системы показана на рис. 4. Массы грузов $m_1 = 4 \text{ кг}$, $m_2 = 1 \text{ кг}$, $m_3 = 1,5 \text{ кг}$. Определите ускорения a грузов и натяжения T нитей. Нити и блоки невесомы, нити нерастяжимы, трение отсутствует.

138. Определить ускорение тела массы M в системе, изображенной на рис. 5, если масса брусков $m_1 = 1 \text{ кг}$, $m_2 = 2 \text{ кг}$, $M = 5 \text{ кг}$, а угол в основании клиньев $\alpha = 45^\circ$. Массой блоков и силами трения можно пренебречь. Клинья считать закрепленными жестко.

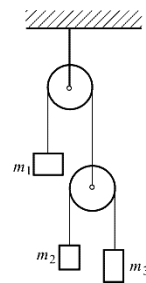


Рисунок 4

139. На гладком горизонтальном столе лежит брусок массы $M = 2 \text{ кг}$, на котором находится брусок массы $m = 1 \text{ кг}$. Оба бруска соединены легкой нитью, перекинутой через невесомый блок (рис. 6). Какую силу F нужно приложить к нижнему бруску, чтобы он начал двигаться от блока с постоянным ускорением $a = g/2$? Коэффициент трения между брусками $\mu = 0,5$. Трением между нижним бруском и столом пренебречь.

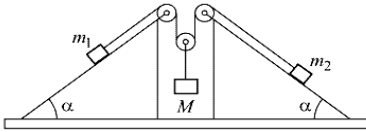


Рисунок 5

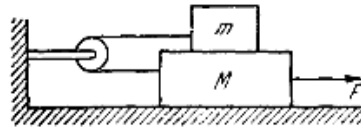


Рисунок 6

140. Найти ускорения a_1 и a_2 брусков, масса которых m_1 , m_2 и натяжение нити T в системе, изображенной на рис. 7. Массой блоков и нитей пренебречь.

141. Тело массы $M = 990 \text{ г}$ лежит на горизонтальной поверхности. В него попадает пуля массы $m = 10 \text{ г}$ и застревает в нем. Скорость пули составляет $v = 700 \text{ м/с}$ и направлена горизонтально. Какой путь S пройдет тело до остановки, если коэффициент трения между телом и поверхностью $\mu = 0,05$?

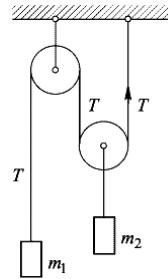


Рисунок 7

142. Стальной шарик массой $m = 10 \text{ г}$ упал с высоты $h_1 = 5 \text{ м}$ на стальную плиту и подскочил после удара на $h_2 = 2 \text{ м}$. Определить импульс, полученный плитой.

143. Две лодки идут на встречу параллельным курсом. Когда лодки находятся напротив друг друга, с одной из лодок во встречную перебрасывается мешок массой $m = 50 \text{ кг}$, в результате чего лодка, с которой перебросили мешок, остановилась, а вторая лодка продолжила движение в прежнем направлении со скоростью $v = 7 \text{ м/с}$. Каковы были скорости лодок до встречи, если массы лодок $m_1 = 300 \text{ кг}$ и $m_2 = 700 \text{ кг}$?

144. Определить силу, с которой винтовка действует на плечо стрелка при выстреле, если считать, что со стороны винтовки действует постоянная сила и смещает плечо стрелка на $S = 1,5 \text{ см}$, а пуля покидает ствол мгновенно. Масса винтовка $M = 5 \text{ кг}$, масса пули $m = 10 \text{ г}$, скорость ее при вылете $v = 500 \text{ м/с}$.

145. Некоторая планета массы M движется по окружности вокруг Солнца со скоростью $v = 34,9 \text{ км/с}$. Найти период обращения этой планеты.

Динамика вращательного движения

Момент M силы F относительно какой-нибудь оси вращения определяется формулой

$$M = Fl,$$

где l – расстояние от прямой, вдоль которой действует сила, до оси вращения.

Основной закон динамики вращательного движения (закон сохранения момента импульса) выражается уравнением

$$Mdt = dL = d(J\omega),$$

где M – момент сил, приложенных к телу; L – момент импульса тела; J – момент инерции тела; ω – его угловая скорость.

Твердое тело, находящееся под действием вращающего момента M , движется с угловым ускорением

$$\varepsilon = \frac{M}{J},$$

где $J = \text{const}$ – момент инерции тела относительно оси вращения.

Моменты инерции некоторых тел:

- тонкостенной круглой трубы (обруча) относительно оси совпадающей с осью трубы (обруча) $J = mr^2$, r – радиус трубы (обруча);
- тонкого стержня длиной l относительно оси, перпендикулярной к стержню и проходящей сквозь его середину $J = \frac{1}{12} ml^2$;

- сплошного однородного круглого цилиндра (диска) относительно оси, совпадающей с его осью $J = \frac{1}{2}mr^2$;
- сплошного однородного шара, относительно оси совпадающей с его диаметром $J = \frac{2}{5}mr^2$.

Соотношение Штейнера

$$J = J_0 + mb^2,$$

где J_0 – момент инерции тела относительно оси, проходящей сквозь центр инерции; J – момент инерции относительно оси, параллельной первой; b – расстояние между осями.

Кинетическая энергия вращающегося тела $W_k = \frac{J\omega^2}{2}$.

146. Однородный цилиндр массы $M = 9$ кг и радиуса $R = 30$ см вращается без трения вокруг горизонтальной оси под действием веса груза $m = 2$ кг, прикрепленного к легкой нити, намотанной на цилиндр. Найти угол φ поворота цилиндра в зависимости от времени, если при $t = 0$ $\varphi = 0$.

147. Однородный сплошной шар радиусом $R = 10$ см и массой $m = 5$ кг вращается вокруг оси симметрии согласно уравнению $\varphi = -0,5t^3 + 2t^2$ (рад). Определите вращающий момент M в момент времени $t = 3$ с.

148. Однородный стержень длиной $l = 2$ м и массой $m = 0,5$ кг вращается в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси, проходящей через середину стержня. С каким угловым ускорением ε вращается стержень, если на него действует момент сил $M = 49,05$ мН · м?

149. Две гири с массами $m_1 = 2$ кг и $m_2 = 3$ кг соединены нитью, перекинутой через блок массой $m_2 = 0,5$ кг. Найти ускорение a , с которым движутся гири, и силы натяжения T_1 и T_2 нитей, к кото-

рым подвешены гири. Блок считать однородным диском. Трением пренебречь.

150. Диск массой $m = 4 \text{ кг}$ катится без скольжения по горизонтальной плоскости со скоростью $v = 2 \text{ м/с}$. Найти кинетическую энергию диска.

151. Вентилятор вращается с частотой $\nu = 150 \text{ Гц}$. После выключения вентилятор, вращаясь равнозамедленно, сделал до остановки $N = 75 \text{ об}$. Работа сил торможения $A = 44,4 \text{ Дж}$. Найти момент инерции J вентилятора и момент сил торможения M .

152. Груз, подвешенный на нити длиной $L = 1 \text{ м}$, равномерно вращается по кругу в горизонтальной плоскости. Найти период обращения груза, если при его вращении нить отклонена от вертикали на угол $\alpha = 30^\circ$.

153. Оценить, с какой минимальной скоростью v нужно выпустить на экваторе Земли снаряд массы $m = 1000 \text{ тонн}$, чтобы изменить продолжительность земных суток на $\Delta T = 1 \text{ мин}$?

154. Однородный диск радиуса $R = 40 \text{ см}$ имеет круглый вырез как показано на рис. 8. Масса оставшейся (заштрихованной) части диска $m = 7,3 \text{ кг}$. Найти момент инерции такого диска относительно, оси, проходящей через точку O и перпендикулярной к плоскости диска.

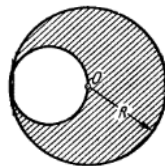


Рисунок 8

155. Найти момент инерции диска, описанного в предыдущей задаче, относительно оси, проходящей через центр круглого выреза и перпендикулярной к плоскости рисунка.

Колебания

Колебания это повторяющийся в той или иной степени во времени процесс изменения состояний системы.

Уравнение *гармонического* колебательного движения имеет вид

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где x – смещение колеблющейся точки от положения равновесия; A – амплитуда; ω – циклическая частота; φ_0 – начальная фаза.

Циклическая частота связана с периодом колебаний соотношением

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

Период колебания (T) это время в течении которого система совершает одно полное колебание

- математический маятник $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, l – длина нити;
- физический маятник $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgb}}$, b – расстояние от точки подвеса маятника до центра инерции, J – момент инерции маятника относительно оси проходящей через точку подвеса маятника;
- пружинный маятник $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, k – жесткость пружины.

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одинакового периода получается гармоническое колебание того же периода с амплитудой

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

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

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

При сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний, одинакового периода, уравнение траектории результирующего колебания имеет вид

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1).$$

В случае затухающих колебаний смещении точки со временем подчиняется уравнению

$$x = Ae^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где A – амплитуда колебаний в начальный момент времени.

Логарифмический декремент затухания

$$\lambda = \beta T.$$

156. Материальная точка совершает гармонические колебания согласно уравнению $x = 4 \cos(\pi t + \frac{\pi}{2})$ м. Определите амплитуду, период, начальную фазу колебаний, максимальную скорость точки, максимальное ускорение точки. Через сколько времени после начала отсчета точка будет проходить через положение равновесия?

157. Определите максимальные значения скорости и ускорения точки, совершающей гармонические колебания с амплитудой $A = 4$ см и периодом $T = 2$ с.

158. Найти период колебания стержня, подвешенного так, что ось подвеса проходит через точку, находящуюся на расстоянии $\frac{L}{3}$ от одного из концов стержня. Масса стержня $m = 0,2$ кг, длина $L = 45$ см.

159. Найти период колебания диска, подвешенного так, что ось подвеса проходит через точку, находящуюся на расстоянии $\frac{R}{2}$ от центра диска. Масса диска $m = 5$ кг, диаметр $d = 1$ м.

160. Физический маятник, который представляет собой шар, радиус которого $R = 10$ см подвешен на нити длиной $L = 50$ см. Определить во сколько раз мы ошибемся, если будем, рассчитывая период, такого маятника, считая его математическим с длиной $l = 60$ см.

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

162. Каков логарифмический декремент затухания маятника длиной $l=1$ м, если его начальная амплитуда 10° , а через $t=2$ мин амплитуда равна $0,3^\circ$.

163. Через сколько времени энергия колебаний камертона с частотой $\nu=600$ Гц уменьшится в $m=10^6$ раз, если логарифмический декремент затухания равен $\lambda=0,0008$.

164. Складываются два колебания одинакового направления, выраженные уравнениями $x_1 = A_1 \cos \frac{2\pi}{T}(t + \tau_1)$ и $x_2 = A_2 \cos \frac{2\pi}{T}(t + 2\tau_2)$, где $A_1 = 4$ см, $A_2 = 5$ см, $\tau_1 = 1/4$ с, $T = 2$ с. Построить векторную диаграмму сложения этих колебаний и написать уравнение результирующего колебания.

165. Точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, уравнения которых $x = A_1 \sin \omega_1 t$ и $y = A_2 \cos \omega_2 t$, где $A_1 = 9$ см, $A_2 = 3$ см, $\omega_1 = \omega_2 = \frac{\pi}{2}$ рад/с. Написать уравнение траектории и построить ее. Показать направление движения точки.

166. Складывается два колебания одинакового направления и одинакового периода: $x_1 = A_1 \sin \omega t$ и $x_2 = A_2 \sin \omega(t + \tau)$, где $A_1 = 4$ см, $A_2 = 3$ см, $\omega = \pi$ рад/с, $\tau = 0,5$ с. Определить амплитуду и начальную фазу результирующего колебания. Написать его уравнение. Построить векторную диаграмму для момента времени $t = 0$.

167. Материальная точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях, уравнения которых: $x = A_1 \cos \omega_1 t$, $y = A_2 \cos \omega_2 t$, где $A_1 = 0,5$ см, $A_2 = 1$ см, $\omega_1 = \pi$ с⁻¹, $\omega_2 = \frac{\pi}{2}$ с⁻¹. Найти уравнение траектории точки. Построить траекторию с соблюдением масштаба и указать направление движения точки.

Молекулярно-кинетическая теория вещества. Уравнение состояния идеального газа. Газовые законы. Закон Дальтона

Согласно молекулярно-кинетической теории (МКТ) все тела состоят из мельчайших частиц – атомов, молекул или ионов, находя-

щихся в непрерывном хаотическом движении, которое называю *тепловым движением*.

Основное уравнение МКТ:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon},$$

где p – давление газа; n – концентрация молекул (число молекул в единице объема); $\bar{\epsilon}$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы газа.

Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы: на каждую степень свободы молекулы в среднем приходится одинаковая кинетическая энергия, равная $\frac{1}{2}kT$. Средняя кинетическая энергия молекулы газа, имеющей i степеней свободы равна

$$\bar{\epsilon} = \frac{i}{2} kT.$$

Для идеального газа *уравнение состояния*

$$pV = NkT = \nu RT,$$

где N – число молекул в объеме V ; k – постоянна Больцмана; T – абсолютная температура; ν – количество вещества; R – универсальная газовая постоянная.

Количество вещества может быть определено по формуле

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A},$$

где M – молярная масса; N_A – число Авогадро, равное числу молекул, содержащихся в одном моле вещества.

Изопроцессами называют термодинамические процессы, происходящие в системе с постоянной массой при каком-либо одном постоянном параметре состояния.

Изотермический ($T = const$): $pV = const$.

Изохорический ($V = const$): $P/T = const$.

Изобарный ($p = const$): $V/T = const$.

Закон Дальтона: давление смеси газов равно сумме парциальных давлений компонентов смеси:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

Парциальное давление – это давление, которое производил бы газ при условии, что все остальные компоненты смеси отсутствуют.

Средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул идеального газа

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

где m_0 – масса одной молекулы газа.

Наиболее вероятная скорость молекул идеального газа

$$v_{н.в.} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}.$$

Средняя арифметическая скорость молекул идеального газа

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}.$$

Число столкновений одной молекулы в единицу времени $Z = \sqrt{2}\pi D n u$, где D – эффективный диаметр молекулы; u – средняя скорость молекул.

Средняя длина свободного пробега

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi D^2 n}.$$

Барометрическая формула

$$p = p_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}},$$

где p – давление газа на высоте h ; p_0 – давление газа у поверхности ($h = 0$).

201. Сколько молекул содержится в трех граммах воды?

202. В сосуде емкостью $V = 5$ л находится газ при давлении $p = 25$ мм рт. ст. и температуре $t = 23^\circ \text{C}$. Сколько молекул находится в сосуде?

203. Вблизи поверхности Земли 78,08 % молекул воздуха приходится на долю азота (N_2), 20,95 % – на долю кислорода (O_2), 0,93 % – на долю аргона (Ar), 0,04 % – на долю других газов. Полагая давление воздуха равным $p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, найти парциальное давление азота, кислорода и аргона. Определить среднюю молекулярную массу воздуха.

204. В сосуде объемом $V = 4$ л находятся масса $m_1 = 10$ г углекислого газа (CO_2) и масса m_2 закиси азота (N_2O) при температуре $T = 450 \text{ К}$. Найти давление смеси в сосуде.

205. Каково давление смеси газов в колбе объемом $V = 2,5$ л, если в ней находится $N_1 = 2,5 \cdot 10^{15}$ молекул кислорода, $N_2 = 4 \cdot 10^{15}$ молекул азота и $m_3 = 3,3 \cdot 10^{-7}$ г аргона? Температура смеси $t = 230^\circ \text{C}$.

206. Сосуд разделен на две равные части полупроницаемой неподвижной перегородкой. В первую половину сосуда введена смесь аргона и водорода при давлении $p = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, во второй половине вакуум. Через перегородку может диффундировать только водород. После окончания процесса диффузии давление в первой половине оказалось равным $p_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Во время процесса температура поддерживалась постоянной. Определите отношение масс аргона и водорода в смеси, которая была первоначально введена в первую половину сосуда.

207. Средняя энергия молекул одноатомного идеального газа $\bar{\epsilon} = 6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$. Давление газа $p = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Найти число молекул в единице объема n .

208. Средняя энергия молекул гелия (He) $\bar{\epsilon} = 3,92 \cdot 10^{-21}$ Дж . Определить среднюю \bar{v} и наиболее вероятную $v_{н.в.}$ скорости молекул гелия при тех же условиях.

209. В сосуде постоянного объема находится кислород (O_2). После того, как в сосуде был осуществлен электрический разряд, половина молекул кислорода распалась на атомы, а температура газа выросла вдвое. Как изменилось давление?

210. Плотность воздуха при температуре $t = 0^\circ C$ и давлении $p = 760$ мм рт. ст. равна $\rho = 1,29$ кг/м³ . Определить массу литра воздуха при температуре $t = 17,3^\circ C$ и давлении $p = 740$ мм рт. ст.

211. Температура комнаты была $t_1 = 17^\circ C$. После того, как протопили печь, температура в комнате поднялась до $t_2 = 24^\circ C$. Объем комнаты $V = 84$ м³ , давление $p = 97$ кПа . На сколько изменилась масса воздуха находящегося в комнате?

212. Определить массу воздуха m , заключенного между двумя оконными рамами при атмосферном давлении $p_0 = 740$ мм рт. ст. , считая, что температура между рамами меняется по линейному закону от $t_1 = 10^\circ C$ до $t_2 = 15^\circ C$. Площадь окна $S = 3$ м² , расстояние между ними $l = 7$ см .

213. Когда из сосуда выпустили некоторое количество газа, давление в нем упало на 40 % , а абсолютная температура уменьшилась на 20 % . Какую часть газа выпустили?

214. Горизонтальный цилиндрический сосуд делится на две части подвижным теплопроводящим поршнем. Каково будет равновесное положение поршня, когда в одну часть сосуда помещено некоторое весовое количество кислорода, а в другую – такое же количество водорода, если общая длина сосуда $l = 1,75$ м?

215. Одинаковые массы водорода и гелия поместили в сосуд объемом V_1 , который отделен от откачанного до состояния вакуума сосуда объема V_2 полупроницаемой перегородкой, пропускающей только молекулы водорода. После установления равновесия давление в первом сосуде упало в два раза. Температура постоянна. Определите отношение V_2/V_1 .

216. При нагревании газа при постоянном объеме на $\Delta t = 10^\circ \text{C}$ давление газа увеличилось на 4 %. При какой начальной температуре находился газ?

217. В цилиндре под поршнем площадью $S = 100 \text{ см}^2$ находится $m = 28 \text{ г}$ азота при температуре $T_1 = 273 \text{ К}$. Цилиндр нагревается до температуры $T_2 = 373 \text{ К}$. На какую высоту h поднимается поршень массой $M = 1,5 \text{ кг}$? Атмосферное давление $p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

218. Посередине горизонтальной трубы, открытой с обоих концов, находится поршень площади $S = 1,5 \text{ дм}^2$ и массы $m = 0,79 \text{ кг}$, герметично прилегая к гладким стенкам трубы. Трубу закрывают с концов и устанавливают вертикально. На сколько надо нагреть воздух под поршнем, чтобы вернуть его в прежнее положение? Температура атмосферного воздуха $T = 273 \text{ К}$, атмосферное давление $p_0 = 10^5 \text{ Па}$, поршень и труба теплонепроницаемы.

219. Объем идеального газа при нагревании изменяется по закону $V = \alpha \sqrt{T}$, где α – постоянная величина. Какой вид будет иметь график этого процесса в координатах p, V ?

220. Один моль идеального газа участвует в процессе, график которого в координатах p, V представлен на рис. 9. Продолжения отрезков 1-2 и 3-4 проходят через начало координат, а кривые 1-4 и 2-3 являются изотермами. Изобразите этот процесс в координатах V, T и найдите объем V_3 , если известны объемы V_1 и $V_2 = V_4$.

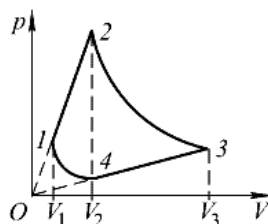


Рисунок 9

221. Какая температура соответствует средней квадратичной скорости молекул углекислого газа, равной $v_{кв} = 720 \text{ км/ч}$?

222. Найти наиболее вероятную, среднюю и среднюю квадратичную скорости молекул кислорода при температуре $t = 7^\circ \text{C}$.

223. Сравнить полное число молекул в атмосферном столбе с основанием $S = 1 \text{ см}^2$ с числом молекул в столбе высотой $h = 1000 \text{ м}$ и тем же основанием.

224. В поле земного тяготения находятся частицы пыли, имеющие массу $m = 8,5 \cdot 10^{-22} \text{ кг}$ и объем $V = 5 \cdot 10^{-22} \text{ м}^3$. На какой высоте их концентрация уменьшится в 2 раза? Давление воздуха $p_0 = 10^5 \text{ Па}$, температура $t = 20^\circ \text{ C}$.

225. Оцените длину свободного пробега молекулы в воздухе при нормальных условиях. Диаметр молекулы $D = 3,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

226. При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул азота будет равна $\lambda = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, если эффективный диаметр молекулы азота $D = 3,1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$?

227. При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул водорода будет равна $\lambda = 2,5 \text{ см}$. Температура $t = 68^\circ \text{ C}$. Эффективный диаметр молекулы водорода $D = 0,28 \text{ нм}$.

228. Найти среднюю продолжительность свободного пробега молекул кислорода при давлении $p = 2 \text{ мм рт. ст.}$ и температуре $t = 27^\circ \text{ C}$. Эффективный диаметр молекулы кислорода $D = 0,36 \text{ нм}$.

Первое начало термодинамики. Теплоемкость

Первое начало термодинамики: количество теплоты δQ , сообщаемое системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы dU и на совершение системой работы δA

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

Работа при расширении газа при постоянном давлении равна

$$\delta A = p dV,$$

где dV – бесконечно малое приращение объема системы.

Теплоемкостью C тела называют физическую величину, численно равную отношению бесконечно малого количества теплоты δQ , полученного телом, к изменению dT температуры тела в рассматриваемом термодинамическом процессе:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Молярной теплоемкостью называют теплоемкость одного моля вещества:

$$C_M = \frac{\delta Q}{\nu dT}, \quad \nu = \frac{m}{M}.$$

Молярная теплоемкость идеального газа при постоянном объеме равна

$$C_V = \frac{i}{2} R,$$

где i – число степеней свободы молекулы.

Молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении равна

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

Удельной теплоемкостью называют теплоемкость единицы массы вещества.

Адиабатным (адиабатическим) называют процесс, происходящий в отсутствие теплообмена с окружающей средой

$$\delta Q = 0.$$

Для равновесного адиабатного процесса в идеальном газе справедливо уравнение Пуассона

$$pV^\gamma = \text{const},$$

где $\gamma = C_p / C_V$ – коэффициент Пуассона (показатель адиабаты).

229. Азот, масса которого $m = 200$ г нагревают при постоянном давлении от температуры $T_1 = 300$ К до $T_2 = 370$ К. Какое количество теплоты поглощается при этом? Каков прирост внутренней энергии газа? Какую внешнюю работу производит давление газа?

230. Производится сжатие некоторой массы двухатомного газа ($\gamma = 1,4$) один раз изотермически, другой раз адиабатно. Начальные температура и давление сжимаемого газа оба раза одинаковы. Конечное давление в n раз больше начального. Найти отношение работ сжатия при адиабатном и изотермическом процессах $n = 100$.

231. Некоторое количество идеального одноатомного газа сжимают адиабатно до тех пор, пока давление газа p_2 не превысит начальное p_1 в десять раз. Затем газ расширяется изотермически до тех пор, пока его объем не достигнет первоначального значения. Определите отношение p_2/p_1 конечного и начального давлений газа.

232. Идеальный газ, взятый в количестве $\nu = 1$ моль, первоначально находившийся при нормальных условиях, переводят в состояние с вдвое большими объемом и давлением, последовательно осуществляя изобарный и изохорный процессы. Какое количество теплоты ΔQ подведено к газу? Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме $C_V = 21$ Дж/(моль · К).

233. Идеальный одноатомный газ, взятый в количестве $\nu = 1$ моль, переводится из начального состояния с температурой $T_1 = 300$ К в состояние, в котором его температура увеличивается в три раза, а объем уменьшается в два раза. Определите подведенное к газу количество теплоты ΔQ , если из всех путей перевода газа из начального состояния в конечное, при котором давление газа не падает ниже начального, был выбран путь, когда над газом совершается минимальная работа.

234. Для определения удельной теплоемкости цинка c_2 кусок его массы $m_2 = 235,6$ г нагрет до температуры $t_1 = 99,3^\circ\text{C}$ и опущен в латунный калориметр. Удельная теплоемкость латуни $c_1 = 387,5$ Дж/(кг · °С), масса калориметра и мешалки $m_1 = 100$ г, удельная теплоемкость воды $c = 4200$ Дж/(кг · °С) масса воды $m = 209,3$ г; начальная температура калориметра и воды $t_0 = 20,5^\circ\text{C}$. Температура воды в калориметре повысилась до $t = 27,6^\circ\text{C}$. Определить удельную теплоемкость цинка.

235. На диаграмме P, V , изображенной на рис. 10, показаны различные обратимые процессы изменения состояния некоторой термодинамической системы. Известно, что когда система переходит из состояния 1 в состояние 2 по пути 1-3-2, то она получает $\Delta Q_{132} = 80$ Дж тепла и при этом совершает работу $A_{132} = 30$ Дж.

а) Какое количество тепла ΔQ_{142} получает система, переходя из состояния 1 в состояние 2 по пути 1-4-2, если известно, что при этом она совершает работу $A_{142} = 10$ Дж?

б) Система возвращается из состояния 2 в состояние 1 по пути 2-1. Совершенная при этом работа равна $A_{21} = 20$ Дж.

Какое количество тепла ΔQ_{21} отдаст система в ходе этого процесса?

в) Найти количество тепла ΔQ_{14} и ΔQ_{42} , поглощаемые системой в процессах 1-4 и 4-2, если разность внутренних энергий $U_4 - U_1 = 40$ Дж.

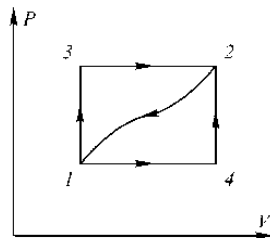


Рисунок 10

236. В сосуде емкостью $V = 10$ л находится кислород под давлением $P_0 = 1$ атм. Стенки сосуда могут выдержать давление до $P_1 = 10$ атм. Какое максимальное количество тепла ΔQ можно сообщить газу?

237. Идеальный газ расширяется изотермически от объема $V_1 = 0,1$ м³ до объема $V_2 = 0,3$ м³. Конечное давление газа $p_2 = 2,1 \cdot 10^5$ Па. Определить: приращение внутренней энергии газа ΔU ; работу A , совершаемую газом; получаемое газом количество теплоты ΔQ ; начальное давление газа p_1 .

238. Некоторое количество идеального газа с трехатомными жесткими молекулами перешло адиабатически из состояния с температурой $T_1 = 280$ К в состояние, характеризуемое параметрами: $T_2 = 350$ К, $p_2 = 2 \cdot 10^5$ Па, $V_2 = 50$ л. Какую работу A совершает при этом газ?

239. Два теплоизолированных сосуда с объемами $V_1 = 1$ л и $V_2 = 3$ л соединены трубкой с краном. До открытия крана в первом сосуде содержался азот под давлением $P_1 = 0,5$ атм при температуре $t_1 = 0^\circ \text{C}$, а во втором – аргон под давлением $P_2 = 1,5$ атм при температуре $t_2 = 100^\circ \text{C}$. Определить, какие давление и температура установятся в смеси газов, если открыть кран $c_{N_2} = 1042$ Дж/кг·К, $c_{Ar} = 519$ Дж/кг·К.

240. При некотором политропическом процессе гелий был сжат от начального объема в $V_1 = 4$ л до конечного объема в $V_2 = 1$ л. Давление при этом возросло от $P_1 = 1$ атм до $P_2 = 8$ атм. Найти теплоемкость C всей массы гелия, если его начальная температура $T_1 = 300$ К. Коэффициент Пуассона для гелия $C_p/C_v = 1,66$.

241. Теплоемкость идеального газа при некотором политропическом процессе равна $C = C_v + 0,2R$. Найти значение показателя политропы n этого процесса.

242. Нагревается или охлаждается идеальный газ, если он расширяется по закону $pV^2 = \text{const}$? Какова молярная теплоемкость C_M газа при этом процессе?

Второе начало термодинамики. Термодинамические циклы. КПД циклов

Второе начало термодинамики: невозможен процесс, единственным результатом которого являлась бы передача тепла от более холодного тела к более горячему (*формулировка Клаузиуса*).

Энтропия – функция состояния системы, равная в равновесном процессе количеству теплоты dQ сообщенной системе или отведенной от системы, отнесённому к термодинамической температуре T системы.

Разность энтропий двух состояний 2 и 1 определяется формулой

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}.$$

КПД тепловой машины равен

$$\eta = \frac{A}{\Delta Q_{нагр}}$$

где $\Delta Q_{нагр}$ – количество теплоты, полученное от нагревателя за один цикл, A – работа, совершенная за один цикл.

КПД прямого цикла Карно

$$\eta = \frac{T_{нагр} - T_{хол}}{T_{нагр}}$$

243. Работу одного из первых двигателей внутреннего сгорания можно моделировать циклом, состоящим из адиабаты, изобары и изохоры (рис. 11). Определить теоретический КПД такого двигателя, если известно отношение n максимального и минимального объемов газа (степень сжатия) и показатель адиабаты γ .

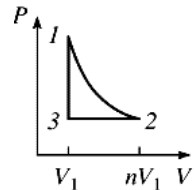


Рисунок 11

244. Тепловой двигатель мощности N работает по циклу, состоящему из двух изобар и двух адиабат; максимальное и минимальное давления газа в пределах цикла отличаются в n раз. Определите расход m топлива с удельной теплотой сгорания q за время Δt работы двигателя, если уравнение адиабаты для данного газа может быть записано в виде $Pr^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = const$, где γ – известный показатель адиабаты газа.

245. Работу карбюраторного (бензинового) двигателя внутреннего сгорания можно моделировать циклом Отто, который состоит из двух адиабат и двух изохор (рис. 12). Выразить теоретический КПД двигателя через степень сжатия $n = 10$. Рабочим веществом является азот (N_2).

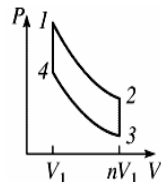


Рисунок 12

246. Тепловая машина Карно, имеющая КПД $\eta = 40\%$, начинает использоваться при тех же тепловых резервуарах как и холодильная машина. Сколько тепла ΔQ_2 эта машина может перевести от холо-

дильника к нагревателю за один цикл, если к ней за каждый цикл подводится работа $A = 10 \text{ кДж}$?

247. Цикл Дизеля, описывающий работу одноименного двигателя, состоит из изобары, изохоры и двух адиабат (рис. 13). Вычислите теоретический КПД, зная n и n_1 .

248. Один моль одноатомного идеального газа ($\gamma = 5/3$) совершает в тепловой машине цикл Карно

между тепловыми резервуарами с температурами $t_1 = 125^\circ \text{C}$ и $t_2 = 25^\circ \text{C}$. Наименьший объем газа в ходе цикла $V_1 = 5 \text{ л}$, наибольший – $V_2 = 20 \text{ л}$. Какую работу A совершает эта машина за один цикл? Сколько тепла ΔQ_1 берет она от высокотемпературного резервуара за один цикл? Сколько тепла ΔQ_2 поступает за цикл в низкотемпературный резервуар?

249. В газовой турбине изменение состояния рабочего тела описывается циклом из двух изобар и двух адиабат (рис. 14). Найти теоретический КПД турбины, если отношение давлений на изобарах равно m .

250. Вычислить изменения внутренней энергии и энтропии одного моля идеального одноатомного газа и количество поглощенного тепла при расширении газа по политропе $PV^3 = \text{const}$ от объема $V_1 = 1 \text{ л}$ и давления $P_1 = 20 \text{ атм}$ до объема $V_2 = 3 \text{ л}$.

251. Цикл состоит из двух изохор и двух изобар (рис. 15). Показать, что для любого вещества с постоянными теплоемкостями C_V и C_P температуры в точках 1, 2, 3, 4 связаны соотношением $T_1 T_3 = T_2 T_4$.

252. Найти изменение энтропии ΔS водорода массой $m = 5 \text{ г}$, изотермически расширившегося от объема $V_1 = 10 \text{ л}$ до объема $V_2 = 25 \text{ л}$.

253. Один киломоль азота при $T_1 = 400 \text{ К}$ и два киломоля кислорода при температуре $T_2 = 300 \text{ К}$ смешивают при постоянном дав-

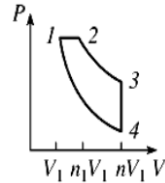


Рисунок 13

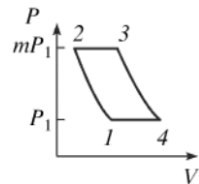


Рисунок 14

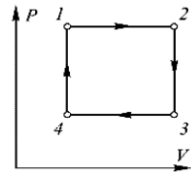


Рисунок 15

лении, равном $p = 10^5 \text{ Па}$. Определить изменение энтропии в этом процессе.

254. В некоторой температурной области энтропия термодинамической системы изменяется с температурой по закону: $S = a + bT$, где a – константа; $b = 7 \text{ Дж}/\text{К}^2$. Какое количество теплоты ΔQ получает система при обратимом нагревании в этой области от $T_1 = 200 \text{ К}$ до $T_2 = 300 \text{ К}$?

255. Энтропия $m_1 = 1 \text{ г}$ азота при температуре $t_1 = 25^\circ \text{С}$ и давлении $p_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ равна $S_1 = 6,85 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot \text{К})$. Определить энтропию $m_2 = 2 \text{ г}$ азота при температуре $t_2 = 100^\circ \text{С}$ и давлении $p_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Реальные газы. Критическое состояние

Уравнение Ван-дер-Ваальса

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

где V_M – объем одного моля вещества; a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса.

Соотношение между постоянными Ван-дер-Ваальса и параметрами критического состояния ($V_{кр}$ – критический объем одного моля)

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

256. Найти постоянные уравнения Ван-дер-Ваальса для азота, если для азота $t_{кр} = -146^\circ \text{С}$, $P_{кр} = 33 \text{ атм}$.

257. Найти критическую плотность воды, если критическое давление для воды $P_{кр} = 195 \text{ атм}$, а критическая температура $t_{кр} = 374^\circ \text{С}$, предполагая, что вода подчиняется уравнению Ван-дер-Ваальса.

258. Два баллона с объемами $V_1 = V_2 = 1 \text{ л}$ соединены трубкой с краном. В объеме V_1 находится воздух под атмосферным давлением, а объем V_2 откачан до предельного вакуума. Считая, что воздух

подчиняется уравнению Ван-дер-Ваальса, а стенки баллонов и трубки адиабатические, определить, на сколько изменится температура газа после открытия крана. Начальная температура $T = 290 \text{ K}$, для воздуха $a = 0,139 \text{ Н} \cdot \text{м}^4 / \text{моль}^2$.

259. Атмосфера Венеры почти целиком состоит из CO_2 . Найти давление на поверхности планеты, если плотность газа $\rho = 0,07 \text{ г/см}^3$ и его температура $T = 750 \text{ K}$. Газ считать ван-дер-ваальсовским с критическими параметрами $P_{кр} = 73 \text{ атм}$, $V_{кр} = 93 \text{ см}^3 / \text{моль}$ и $T_{кр} = 304 \text{ K}$. Провести сравнение с давлением идеального газа при тех же условиях.

260. В баллоне емкостью $V = 20 \text{ л}$ находится $\nu = 80 \text{ моль}$ некоторого газа. При температуре $t = 14^\circ \text{C}$ давление газа равно $P = 90 \text{ атм}$, при $t = 63^\circ \text{C}$ давление газа равно $P = 109 \text{ атм}$. Вычислить постоянные Ван-дер-Ваальса для этого газа.

261. Кислород массой $m = 150 \text{ г}$ расширяется от объема $V_1 = 4 \text{ л}$ до объема $V_2 = 6 \text{ л}$. Определите работу межмолекулярных сил притяжения при этом расширении. Поправку a примите равной $a = 0,136 \text{ Н} \cdot \text{м}^4 / \text{моль}^2$.

262. Азот массой $m = 200 \text{ г}$ расширяется в вакуум, в результате чего объем газа увеличивается от $V_1 = 5 \text{ л}$ до объема $V_2 = 8 \text{ л}$. Какое количество теплоты ΔQ необходимо сообщить газу, чтобы его температура осталась неизменной? Поправку a примите равной $a = 0,135 \text{ Н} \cdot \text{м}^4 / \text{моль}^2$.

Поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение σ численно равно силе, приложенной к единице длины края поверхностной пленки жидкости

$$\sigma = F/l.$$

При изменении площади пленки на ΔS совершается работа

$$\Delta A = \sigma \Delta S.$$

Добавочное давление, вызванное кривизной поверхности жидкости, определяется *формулой Лапласа*

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости.

263. В дне сосуда имеется трещина шириной $a = 0,01$ мм. До какой высоты h можно налить ртуть в сосуд, чтобы она еще не вытекала через трещину? Плотность ртути $\rho = 13,6 \text{ г/см}^3$. Поверхностное натяжение (при $t = 15^\circ \text{C}$) $\sigma = 0,487$ Н/см.

264. На дне пруда глубиной $h = 2$ м выделяются пузырьки газа с диаметром $d_1 = 0,05$ мм. Чему будут равны диаметры d_2 этих пузырьков, когда они поднимутся к поверхности воды? Поверхностное натяжение воды $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

265. Найти поверхностное натяжение σ жидкости, если в капилляре с диаметром $d = 1$ мм она поднимается на высоту $h = 32,6$ мм. Плотность жидкости $\rho = 1 \text{ г/см}^3$. Краевой угол мениска равен нулю.

266. Насколько изменится разность уровней $h_1 - h_2$ воды в двух сообщающихся капиллярах с диаметрами $d_1 = 0,1$ мм и $d_2 = 0,4$ мм при нагревании от $t_1 = 20^\circ \text{C}$ до $t_2 = 80^\circ \text{C}$, если поверхностное натяжение воды для этих температур равно соответственно $\sigma_1 = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м и $\sigma_2 = 62 \cdot 10^{-3}$ Н/м?

267. На какую высоту h поднимается вода между двумя вертикальными стеклянными пластинками, частично погруженными в эту жидкость, если расстояние между ними $d = 0,5$ мм? Поверхностное натяжение воды считать равным $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м. Краевой угол θ в этом случае можно считать равным 0° .

268. Чему равен коэффициент поверхностного натяжения воды, если с помощью пипетки, имеющей кончик диаметром $d = 0,4$ мм, можно дозировать воду с точностью до $m = 0,01$ г?

269. Грамм ртути помещен между двумя параллельными стеклянными пластинками. Какую силу надо приложить к верхней пластинке, чтобы ртуть имела форму круглой лепешки радиусом $r = 5$ см. Поверхностное натяжение ртути $\sigma = 0,465$ Н/см. Считать, что ртуть совершенно не смачивает стекло, так что угол между краем свободной поверхности ртути и стеклянной пластинкой равен нулю.

270. Оцените, сколько воды можно унести в решетке. Ячейка решетки представляет собой квадратик площади $S = 1 \times 1$ см². Решето водой не смачивается.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 1990–2002.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 3 т. / И.В. Савельев – М.: Наука, 1977–1989. – Т. 1.
3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1977–1990. – Т. 1–2.
4. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 2001–2002.
5. Наркевич, И.И. Физика для вузов / И.И. Наркевич, Э.И. Волмянский, С.И. Лобко. – Минск: Вышэйшая школа, 1992–1994. – Т. 1.
6. Зисман, Г.А. Курс общей физики: в 3 т. / Г.А. Зисман, О.М. Голдес. – М.: Наука, 1972–1974. – Т. 1–3; Киев: Дніпро, 1994. – Т. 1.
7. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – М.: Наука, 1973–1990; СПб.: Спец. лит., Лань, 1999.
8. Чертов, А.Г. Задачник по физике / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. – М.: Высшая школа, 1981, 1988.
9. Савельев, И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1982, 1988, 2001.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Рабочая программа курса физики	4
Механика	4
Основы молекулярной физики и термодинамики	6
Методические указания по выполнению контрольных работ	9
Правила оформления титульного листа	11
Варианты контрольной работы	12
Задачи контрольной работы и для самостоятельного решения	13
Рекомендуемая литература.....	44

Учебное издание

МЕХАНИКА, СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания, контрольные задания
и учебные материалы для студентов МИДО

Составитель
БОЯРШИНОВА Оксана Александровна

Подписано в печать 28.03.2011.

Формат 60×84^{1/16}. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2,67. Уч.-изд. л. 2,09. Тираж 100. Заказ 969.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.