



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)


**ИНСТИТУТ НАУКОЁМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРЕДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОП ДТФИТ

И.о. зам. директора по учебной и  
научно-исследовательской работе ИНТПМ

  
\_\_\_\_\_  
(подпись)

Нефедев К.В.  
(ФИО)



\_\_\_\_\_  
(подпись)  
2022 г.

Красицкая С.Г.  
(ФИО.)

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

Молекулярная физика

**Направление подготовки 03.03.02 Физика**

профиль «Цифровые технологии в физике»

**Форма подготовки очная**

курс 1 семестр 2

лекции 72 час.

практические занятия 72 час.

лабораторные работы 72 час.

в том числе с использованием МАО лек. 32 /пр. 32 /лаб. 22 час.

всего часов аудиторной нагрузки 288 час.

в том числе с использованием МАО 58 час.

самостоятельная работа 27 час.

в том числе на подготовку к экзамену 45 час.

контрольные работы (7)

курсовая работа / курсовой проект \_\_\_\_\_ семестр

зачет 2 семестр

экзамен 2 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки 03.03.02 Физика, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 07 августа 2020 г. №891.

Рабочая программа обсуждена на заседании департамента теоретической физики и интеллектуальных технологий

№ \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ »

2021 г.

Директор департамента: профессор, д.ф.-м.н. Нефедев К.В

Составитель: к.ф.-м.н., доцент Макогина Е.И.

**Оборотная сторона титульного листа РПД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**III. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**IV. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**Цель:** на основе представлений об атомно-молекулярном строении и об особой форме молекулярного движения объяснить физические свойства вещества в газообразном, жидком и твердом состояниях; описать и объяснить явления перехода из одного состояния в другое; описать и объяснить физические процессы, проходящие в веществе при внешних воздействиях.

**Задачи:**

- изучить атомно-молекулярное строение вещества в различных агрегатных состояниях;
- изучить молекулярную форму движения и ее закономерности;
- изучить тепловых свойств вещества от строения и молекулярной формы движения;
- изучить процессы, возникающие в веществах при внешних воздействиях – механических, химических и термических;
- изучить явления на границах раздела различных агрегатных состояний вещества;
- изучить процессы перехода из одного фазового состояния в другое;
- овладеть методами статистическим и термодинамическим с помощью математического аппарата: теории случайных величин и процессов, теории дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных.

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции:

Наименование категории (группы) универсальных компетенций	Код и наименование универсальной компетенции выпускника	Результаты обучения по дисциплинам (модулям), практикам
Системное и критическое мышление	УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Определяет роль и значение информации, информатизации общества, информационных технологий, использует теоретические основы информационных процессов преобразования информации

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания (результата обучения по дисциплине)
УК-1.1 Определяет роль и значение информации, информатизации общества, информационных технологий, использует теоретические основы информационных процессов преобразования информации	Знает: значение информации, информатизации общества, информационных технологий, основные понятия и определения теории информации
	Умеет: систематизировать информацию, применять методы преобразования информации, заложенные в современных программных средствах
	Владеет: навыками создания, накопления и обработки информации

Наименование категории (группы) общепрофессиональных компетенций	Код и наименование общепрофессиональной компетенции (результат освоения)	Код и наименование индикатора достижения компетенции
Научное мышление	ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Использует в профессиональной деятельности основы физико-математических и (или) естественных наук

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания (результата обучения по дисциплине)
ОПК-1.1 Использует в профессиональной деятельности основы физико-математических и (или) естественных наук	Знает формулировку фундаментальных законов природы и основные физические и математические законы;
	Умеет применять физические и математические законы для описания наблюдаемых явлений.
	Владеет навыками применения фундаментальных законов физики и математики.

Для формирования вышеуказанных компетенций в рамках дисциплины «Молекулярная физика» применяются следующие методы активного/интерактивного обучения: проблемные лекции, индивидуальная работа на консультациях, работа в малых группах.

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **Раздел I. Молекулярная физика. Статистический метод (24 час.)**

#### **Тема 1. Состояние вещества. Термодинамические параметры.**

#### **Молекулярно-кинетическая теория вещества (8 час.)**

Предмет и задачи молекулярной физики. Молекулярно-кинетическая теория вещества. Характеристики молекул и количества вещества.

Агрегатные состояния вещества и их признаки. Статистический и термодинамический методы в молекулярной физике и термодинамике.

Эмпирические газовые законы: законы Дальтона, Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Шарля, Паскаля, Авогадро, Менделеева-Клапейрона, тепловое расширение твердых тел. Идеальный газ как модель газообразного состояния. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Давление идеального газа. Вывод основного уравнения МКТ идеального газа. Эрготическая гипотеза Больцмана.

Температура и ее физический смысл в молекулярно-кинетической теории. Теплообмен и термодинамическое равновесие. Термометрическое свойство, термометрическая величина. Термодинамическая шкала температур. Теорема Больцмана о равновесном распределении энергии по степеням свободы. Число степеней свободы. Законы идеального газа. Изотермический коэффициент сжимаемости, температурный коэффициент. Графическое представление законов идеального газа.

## **Тема 2. Элементы теории вероятности, статистический метод и статистические распределения (10 час.)**

Скорости газовых молекул. Измерение скорости газовых молекул. Опыт Штерна, метод молекулярных пучков. Элементы теории вероятности. Частота и вероятность. Дискретное и непрерывное распределение вероятности. Плотность вероятности. Условие нормировки. Теоремы сложения и умножения. Средние значения случайных величин, флуктуация. Распределение Максвелла (постановка задачи). Вывод функции распределения молекул по проекциям скоростей. Физический смысл параметра функции распределения и постоянной интегрирования.

Определение функции распределения молекул по абсолютному значению скорости. Геометрическое истолкование полученной функции. Распределение Максвелла в векторной форме и в приведенном виде. Расчеты характерных скоростей молекул при их хаотическом движении: наивероятнейшей скорости, средней и средней квадратичной скоростей, средней скорости по проекции, среднего модуля скорости по проекции, средней относительной скорости, и связи между ними.

Барометрическая формула и вывод закона Больцмана. Связь между распределениями Максвелла и Больцмана. Распределение Максвелла по значениям кинетической энергии. Распределение Максвелла-Больцмана. Распределение Больцмана для дискретного спектра значений энергии (самостоятельно).

Броуновское движение. Расчет среднего квадрата смещения броуновской частицы. Формула Эйнштейна-Смолуховского.

## **Тема 3. Неравновесные процессы. Процессы переноса в газах (6 час.)**

Элементы молекулярно-кинетической теории неравновесных процессов. Равновесное и неравновесное состояния. Релаксационные процессы и явления переноса. Эффективный диаметр и эффективное сечение молекул газа. Средняя длина свободного пробега. Потенциальная кривая межмолекулярного взаимодействия. Температурная зависимость эффективного сечения молекул и средней длины свободного пробега для газов и жидкостей. Формула Сезерленда. Общая теория переноса в газах.

Диффузия. Самодиффузия. Коэффициент диффузии, зависимость коэффициента диффузии от температуры и давления.

Вязкость или внутреннее трение. Коэффициент вязкости и его зависимость от температуры и давления. Различие температурных зависимостей вязкости газов и жидкостей.

Теплопроводность. Коэффициент теплопроводности газов и его зависимость от температуры и давления. Соотношение между коэффициентами переноса.

## **Раздел 2. Основные принципы (начала) термодинамики.**

### **Термодинамический метод (30 часов)**

#### **Тема 1. Нулевое и первое начало термодинамики. Изопроцессы, политропные процессы. Классическая теория теплоемкости (10 час.)**

Нулевое начало термодинамики. Термодинамические процессы: равновесные или квазистатические, обратимые и необратимые, круговые или циклические. Внутренняя энергия, работа, теплота. Принцип эквивалентности теплоты и работы, опыты Майера и Джоуля. Вывод первого начала термодинамики.

Теплоемкость идеального газа. Теплоемкость при постоянном объеме и давлении. Энтальпия. Вывод уравнения Роберта-Майера. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам идеального газа. Адиабатный процесс. Вывод уравнения Пуассона. Работа идеального газа при адиабатном процессе. Политропный процесс. Вывод уравнения политропы.

Классическая теория теплоемкостей газов и твердых тел (число степеней свободы, теорема Больцмана о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы). Закон Дюлонга-Пти. Недостатки классической теории теплоемкости твердых тел. Элементы квантовой теории теплоемкости. Вывод формулы Эйнштейна. Недостатки теории Эйнштейна.

Теория теплоемкости твердых тел Дебая. Несколько слов о теплопроводности твердых тел. Вывод закона Дебая. Характеристическая температура твердого тела или температура Дебая. Развитие теории теплоемкости твердых тел из представления о фононах и фононном газе.

#### **Тема 2. Второе начало термодинамики. Теоремы Карно и теоремы Клаузиуса (4 час.)**

Второе начало термодинамики. Формулировки второго начала термодинамики Клаузиуса, Кельвина и Планка. Цикл Карно. Вывод работы и к.п.д. идеального цикла Карно. Первая и вторая теоремы Карно. Теорема Клаузиуса о приведенной теплоте. Энтропия и термодинамический смысл энтропии в идеальном обратимом процессе. Математическое выражение второго начала термодинамики для обратимых квазистатических процессов. T-S диаграммы.

Статистический смысл второго начала термодинамики. Вывод формулы Больцмана для энтропии. Закон возрастания энтропии Клаузиуса. Энтропия необратимых процессов.

#### **Тема 3. Газы с межмолекулярным взаимодействием (реальные газы) и жидкости (9 час.)**

Реальные газы. Вывод уравнения Ван-дер-Ваальса. Физический смысл постоянных величин уравнения Ван-дер-Ваальса. Теоретические изотермы

газа Ван-дер-Ваальса. Критические параметры состояния вещества. Закон соответственных состояний. Термодинамика реального газа. Внутренняя энергия и работа реального газа.

Эффект Джоуля-Томсона. Термодинамика эффекта Джоуля-Томсона. Кривая инверсии дифференциального эффекта Джоуля-Томсона. Интегральный эффект Джоуля-Томсона.

Поверхностное натяжение и термодинамика поверхностного натяжения. Краевые углы. Смачивание и несмачивание. Разность давлений по разные стороны изогнутой поверхности жидкости. Формула Лапласа.

#### **Тема 4. Фазовые равновесия и фазовые превращения (3 час.)**

Фазы и фазовые превращения. Условия равновесия фаз химически однородного вещества.

Вывод уравнения Клапейрона-Клаузиуса. Фазовые переходы первого рода. Испарение и конденсация. Плавление и кристаллизация. Диаграммы состояния и тройные точки.

Фазовые переходы второго рода (общие формулировки).

#### **Тема 5. Термодинамические функции и условия термодинамической устойчивости (4 час.)**

Метод термодинамических потенциалов или характеристических функций. Термодинамический потенциал или функция Гиббса. Соотношения Максвелла. Основной критерий термодинамической устойчивости.

## **II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **Практические занятия (54 час.)**

#### **Тема 1. Идеальный газ. Уравнение состояния идеального газа. Закон Дальтона. Закон Авогадро. Закон Паскаля, барометрическая формула (6 часов).**

- 1.1. Связь между основными кинетическими характеристиками газа: относительная молекулярная масса, молярная масса, число Авогадро, число Лошмидта, концентрация, плотность. Смесь газов. Закон Дальтона. Молярные и удельные величины (№№ 2.1. – 2.6 по И.Е. Иродову, №№ 2.1 – 2.8 по И.В.Савельеву).
- 1.2. Термометрия. Термометрическое тело, термометрическая величина. Шкала температур ( №№ 10 – 15 по Д.Т. Сахарову, №№ 627 – 632 под ред. Д.В. Сивухина).
- 1.3. Уравнение состояния идеального газа. Процессы. Уравнения процессов в интегральной и дифференциальной форме (№№ 2.7 – 2.13 по И.Е.Иродову, №№ 2.27 – 2.31 по И.В.Савельеву).
- 1.4. Давление газа. Закон Паскаля, барометрическая формула. Градиент температуры по высоте столба газа в однородном поле сил тяжести (№№ 2.14 – 2.21 по И.Е.Иродову).

#### **Тема 2. Молекулярно-кинетическая теория. Распределение Максвелла и**

## **Больцмана (11 часов)**

- 2.1. Функция распределения вероятностей дискретных и непрерывных значений случайной величины. Вычисление основных характеристик функции распределения (№№2.85 – 2.86 по И.Е.Иродову, №№2.74 – 2.78 по И.В.Савельеву).
- 2.2. Распределение Максвелла по проекциям скоростей, по абсолютным значениям скоростей, в «приведенном» виде. Вычисление характеристических скоростей (№№2.88 – 2.104, 2.108 – 2.109 по И.Е.Иродову, №№2.79, 2.78, 2.84, 2.87 по И.В.Савельеву).
- 2.3. Функция распределения молекул по кинетическим энергиям. Вычисление характеристических энергий и сравнение их с характеристическими скоростями (№№2.105 – 2.107 по И.Е.Иродову, №№2.90 по И.В.Савельеву).
- 2.4. Распределение Больцмана. Распределение молекул в однородном потенциальном поле, в поле инерциальных сил (№№2.109 – 2.121 по И.Е.Иродову). Распределение Больцмана для дискретных значений энергии (№2.100 по И.В.Савельеву).

### **Тема 3. Элементы молекулярно-кинетической теории неравновесных процессов. Явления переноса (4 часа)**

- 3.1. Относительное число молекул газа, пролетающих путь  $S$  без столкновений. Средняя длина свободного пробега молекул. Распределение свободных пробегов частиц. Эффективное сечение взаимодействия молекул (№№2.235 – 2.239, 2.242 – 2.243 по И.Е.Иродову).
- 3.2. Вязкость, теплопроводность и диффузия газов. Коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии (№№2.250 – 2.255, 2.266 – 2.272 по И.Е.Иродову)

### **Тема 4. Первое начало термодинамики. Теплоемкость. Уравнения процессов на основе первого начала термодинамики для идеальных газов (11 часов)**

- 4.1. Работа, теплота, внутренняя энергия в интегральной и дифференциальной форме. Вычисление этих термодинамических функций (№№2.25 – 2.43 по И.Е.Иродову, №№2.10 – 2.13, 2.41 – 2.56 по И.В.Савельеву).
- 4.2. Теплоемкость. Число степеней свободы. Использование дифференциальной формы записи первого начала термодинамики для нахождения уравнения процесса и теплоемкости газа (№№2.44 – 2.56, 2.69 – 2.84 по И.Е.Иродову, №№2.58 – 2.62 по И.В.Савельеву).

### **Тема 5. Второе начало термодинамики. Неравенство Клаузиуса. Энтропия (10 часов)**



- 5.1. Расчет к.п.д. тепловых и холодильных машин, в которых идеальный газ совершает циклы, состоящие из различных изопроцессов (например: циклы Дизеля и Отто). Цикл Карно и к.п.д. цикла Карно (№№2.122 – 2.135 по И.Е.Иродову, №№2.154 – 2.160 по И.В.Савельеву).
- 5.2. Неравенство Клаузиуса. Изменение энтропии при обратимых квазистатических процессах или основное уравнение термодинамики для обратимых процессов в идеальных газах (№№2.137 – 2.146 по И.Е.Иродову).
- 5.3. Свободная энергия Гельмгольца и работа идеального газа в квазистатическом изотермическом процессе (№№2.162 – 2.165 по И.Е.Иродову).
- 5.4 Статистический смысл энтропии. Формула Больцмана (№№2.164 – 2.170 по И.Е.Иродову, №№2.106 – 2.109 по И.В.Савельеву).

## **Тема 6. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Термодинамика реального газа (10 часов)**

- 6.1. Уравнение состояния ван-дер-ваальсовского газа. Постоянные Ван-дер-Ваальса и их физический смысл. Кинетика процессов в реальных газах (№№2.22 – 2.24, 2.212 – 2.224 по И.Е.Иродову, №№2.162 - 2.165 по И.В.Савельеву).
- 6.2. Применение первого начала термодинамики для решения задач с ван-дер-ваальсовским газом (№№2.57 – 2.62, 2.225 – 2.227 по И.Е.Иродову, №№2.166 – 2.171 по И.В.Савельеву).
- 6.3. Эффект Джоуля-Томсона. Вычисление приращения температуры вследствие эффекта Джоуля-Томсона (№№2.63 – 2.65 по И.Е.Иродову, №№2.172 – 2 175 по И.В.Савельеву).
- 6.4. Изменение энтропии при квазистатических обратимых процессах – основное уравнение термодинамики для ван-дер-ваальсовского газа в интегральной и дифференциальной форме (№№2.147 – 2.148 по И.Е.Иродову).

## **Тема 7. Жидкости. Капиллярные явления (2 часа)**

- 7.1. Добавочное (капиллярное) давление в жидкости под произвольной поверхностью. Формула Лапласа (№№2.171 – 2.191 по И.Е.Иродову).
- 7.2. Приращение свободной энергии поверхностного слоя жидкости. Расчет количества тепла, необходимого для образования единицы площади поверхностного слоя жидкости при изотермическом увеличении ее поверхности (№№2.192 – 2.197 по И.Е.Иродову).

### **Лабораторные работы (54 час.)**

**Лабораторная работа №2.1.** Изучение температурной зависимости вязкости жидкости при помощи вискозиметра с падающим шариком (5 час.).

**Лабораторная работа №2.2.** Экспериментальная проверка газового закона Бойля-Мариотта с применением установки Cobra3 (5 час).

**Лабораторная работа №2.3.** Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца с применением установки Cobra3 (5 час).

**Лабораторная работа №2.4.** Определение теплоемкости металлов (5 час).

**Лабораторная работа № 2.5.** Распределение молекул газа по скоростям (распределение Максвелла) (5 час).

**Лабораторная работа №2.6.** Моделирование распределения концентрации молекул газа в гравитационном поле Земли (барометрическая высота) (5 час).

**Лабораторная работа №2.7.** Определение коэффициента поверхностного натяжения (5 час).

**Лабораторная работа №2.10.** Определение коэффициента вязкости и средней длины свободного пробега молекул воздуха (5 час).

**Лабораторная работа №2. 14.** Определение коэффициента теплового расширения металлов (5 час).

**Лабораторная работа №2.12.** Снятие кривой плавления и кристаллизации гипосульфита (5 час).

**Лабораторная работа №2.17.** Определение отношения теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме методом Клемана и Дезорма (4 час).

**Лабораторная работа №2.18.** Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса (5 час).

### **III. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ДЛЯ ОБУЧАЕМЫХ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Молекулярная физика» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;

характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;

требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;

критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

### **IV. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций		Оценочные средства	
				текущий контроль	промежуточная аттестация
1.	Агрегатные состояния вещества и их	УПК-1.1;	знает характеристики молекул и количества вещества	Контрольная работа	Экзаменационные вопросы 1-3

	признаки	УК-1.1		по теории №1	
			Умеет формулировать физический смысл понятий и величин, решать простейшие задачи	Устный опрос и отчет по лабораторной работе №2.12, №2.14	Тестирование №1
			владеет методами моделирования состояния вещества, его математическим описанием и физическим объяснением	Контрольная работа по решению задач №2	Тестирование №1
2.	Молекулярно-кинетическая теория вещества, молекулярно-кинетическая теория идеального газа	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> Основное уравнение МКТ, уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона), газовые законы и их графики <b>Умеет</b> выводить уравнения МКТ и уравнение состояния идеального газа, формулировать физический смысл уравнений и законов <b>Владеет</b> дифференциальными и интегральными методами для решения задач по МКТ	Дом. Задание: решение задач №2.7-2.13 по сб. задач (И.Е.Иродов), отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.2	Экзаменационные вопросы 4-7  Тестирование № 1
3.	Распределение Максвелла. Распределение Больцмана и барометрическая формула. Распределение Максвелла-Больцмана. Броуновское движение и формула Эйнштейна-Смолуховского.	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> элементы теории вероятности, основные физические идеи выводов данных распределений, формулы распределений. <b>Умеет</b> выводить данные распределения, анализировать полученные результаты <b>Владеет</b> статистическим методом для решения задач	Устная защита решений индивидуальных задач; Отчеты и теоретический опрос по лабораторным работам №2.5, №2.6, отчет по зачетным задачам	Экзаменационные вопросы 8-16  Тестирование № 1
4.	Эффективный диаметр и эффективное сечение молекул.	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> определения и формулы данных характеристик, Законы диффузии,	Отчеты и теоретические опросы по	Экзаменационные вопросы 17-21  Тестирование № 2

	Среднее число столкновений и длина свободного пробега. Неравновесные процессы и явления переноса (диффузия, вязкость и теплопроводность )		вязкости и теплопроводности, коэффициенты процессов переноса и их связь. <b>Умеет</b> выводить законы процессов переноса, моделировать процессы переноса, объяснять физический смысл законов. <b>Владеет</b> знанием и умением работать с данными вопросами в решении задач.	лабораторным работам №2.1, №2.10, №2.18, отчеты по решению зачетных задач	
5.	Нулевое и первое начало термодинамики. Теплота и работа. Внутренняя энергия и энтальпия. Число степеней свободы. Адиабатный и политропный процессы.	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> физический смысл первых начал или принципов термодинамики, определения и формулы всех понятий в данной теме, уравнения адиабатного и политропного процессов. <b>Умеет</b> выводить первое начало термодинамики, рассчитывать теплоту, работу и внутреннюю энергию идеального газа для всех изопроцессов. <b>Владеет</b> термодинамическим методом для решения задач по первому началу термодинамики.	Контрольная работа по теории №3, контрольная работа по решению задач №4, отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.17, отчет по решению зачетных задач	Экзаменационные вопросы 22-26 Тестирование № 3
6.	Классическая теория теплоемкости газов и твердых тел (теория Дюлонга-Пти). Элементы квантовой теории теплоемкости твердых тел (теория Эйнштейна и теория Дебая).	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> общие положения классической и квантовой теории теплоемкости; формулы законов и их физический смысл. <b>Умеет</b> выводить закон Дюлонга-Пти, формулу Эйнштейна, закон Дебая; анализировать выводы и полученные результаты. <b>Владеет</b>	Контрольная работа по теории, отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.4	Экзаменационные вопросы 27-28 Тестирование № 3

			полученными навыками в решении физических задач		
7.	<p>Второе начало термодинамики. Теоремы Карно. Теоремы Клаузиуса. Энтропия и ее термодинамический смысл в идеальном обратимом процессе. Статистический смысл второго начала термодинамики, формула Больцмана.</p>	УПК-1.1; УК-1.1	<p><b>Знает</b> определения всех термодинамических процессов; математический и физический смысл теорем Карно и Клаузиуса, термодинамический и статистический смысл энтропии, закон возрастания энтропии, формулу Больцмана.</p> <p><b>Умеет</b> определять к.п.д. идеальных обратимых процессов Карно, Отто, Дизеля; из теорем Клаузиуса выводить термодинамический смысл энтропии; выводить формулу Больцмана и анализировать полученные результаты.</p> <p><b>Владет</b> полученными навыками в решении теоретических и экспериментальных задач.</p>	Контрольная работа по теории №5, контрольная работа по решению задач №6, отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.	<p>Экзаменационные вопросы 29-33</p> <p>Тестирование № 4</p>
8.	<p>Реальные газы. Экспериментальные и теоретические изотермы реальных газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Метастабильные состояния. Критическое состояние системы и его параметры.</p>	УПК-1.1; УК-1.1	<p><b>Знает</b> основные признаки состояния реального газа; отличие экспериментальных изотерм от теоретических изотерм; уравнение Ван-дер-Ваальса и физический смысл постоянных уравнения Ван-дер-Ваальса; основные характеристики метастабильного и критического состояния реального газа.</p> <p><b>Умеет</b> анализировать как экспериментальные, так и теоретические</p>	Отчет по решению зачетных задач, Устный опрос по теории.	<p>Экзаменационные вопросы 34-35</p> <p>Тестирование №4</p>

			изотермы; выводить уравнение состояния реального газа и определять его физический смысл; <b>Владеет</b> знаниями и навыками для решения экспериментальных и теоретических задач.		
9.	Молекулярные силы в жидкостях. Явления на границе жидкости. Смачивание и несмачивание. Капиллярные явления, формула Лапласа.	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> отличие действия межмолекулярных сил взаимодействия в газах, жидкостях и твердых телах; механизм возникновения поверхностного натяжения и давления под изогнутой поверхностью жидкости; условия смачивания и несмачивания; капиллярные явления и формулу Лапласа. <b>Умеет</b> выводить поверхностную энергию, давление под изогнутой поверхностью жидкости, формулы условий смачивания и несмачивания, формулу Лапласа; анализировать полученные результаты. <b>Владеет</b> знаниями, умениями, навыками для решения экспериментальных и теоретических задач.	Отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.3, №2.7	Экзаменационные вопросы 37-39 Тестирование №4
10.	Фазовые равновесия и фазовые переходы. Диаграммы состояния. Тройная точка. Фазовые переходы первого и второго рода. Зависимость температуры фазового перехода от давления.	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> диаграммы состояния и критические точки на ней; определения фазовых переходов первого и второго рода; уравнение Клапейрона-Клаузиуса и его физический смысл. <b>Умеет</b> анализировать диаграммы состояния и определять на них	Отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.12, устный опрос по теории.	Экзаменационные вопросы 31, 39 Контрольная работа

	Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.		фазовые переходы; анализировать зависимость температуры фазового перехода от давления в уравнении Клапейрона-Клаузиуса. <b>Владеет</b> полученными знаниями, умениями, навыками в решении экспериментальных и теоретических задач.		
11.	Термодинамические или характеристические функции. Соотношения Максвелла. Уравнения Гиббса-Гельмгольца.	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> пять функций состояния: T,P,V,S,U; четыре соотношения Максвелла; четыре характеристических функций и соответствующие им уравнения Гиббса-Гельмгольца; первое и второе TdS-уравнения. <b>Умеет</b> получать соотношения Максвелла; выводить уравнения Гиббса-Гельмгольца; выводить первое и второе TdS – уравнения/ <b>Владеет</b> полученными знаниями, умениями, навыками для определения теплоемкостей в обобщенном уравнении термодинамики; для вывода внутренней энергии реального газа, $(c_p - c_v)$ реального газа, $\frac{c_p}{c_v}$ реального газа, для вычисления энтропии реального газа.	Устный опрос по теории, отчет по решению зачетных задач.	Экзаменационные вопросы 40  Контрольная работа
12.	Эффект Джоуля-Томсона. Термодинамика эффекта Джоуля-Томсона. Кривая инверсии	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> основные положения физики эффекта Джоуля-Томсона; дифференциальное уравнение кривой	Отчет по решению зачетных задач, устный опрос по	Экзаменационные вопросы 36  Контрольная работа

	дифференциально го эффекта Джоуля-Томсона. Интегральный эффект Джоуля- Томсона.		инверсии и его характеристики; изоэнтальпийную кривую; температуру инверсии; интегральную кривую инверсии. <b>Умеет</b> получить и проанализировать изоэнтальпийный процесс; выводить дифференциальное уравнение кривой инверсии, анализировать кривую инверсии; выводить температуру инверсии в эффекте Джоуля-Томсона. <b>Владеет</b> знаниями, умениями, навыками для решения экспериментальных и теоретических задач.	теории	
--	--	--	---	--------	--

Типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, представлены в Приложении 2.

## **V. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

1. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика: учебное пособие для студентов физических специальностей вузов/А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – Москва, «Наука», 1976. -480с.
2. Радченко И.В. Молекулярная физика: учебное пособие / И.В.Радченко – Москва, «Наука», 1965. - 480с.
3. Телеснин Р.В. Молекулярная физика: учебное пособие для студентов физических специальностей университетов / Р.В. Телеснин – Москва, «Высшая школа», 1973. – 360с.
4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: учебное пособие для студентов физических специальностей вузов / А.Н. Матвеев – Москва, «Высшая школа», 1981. – 400с.



5. Сивухин Д.В. Термодинамика и молекулярная физика. Общий курс физики, Т.П: учебное пособие для вузов / Д.В. Сивухин – Москва, «Наука», 1990. – 592с.

6. Савельев И.В. Молекулярная физика. Курс общей физики, Т.І: учебное пособие для студентов втузов / И.В. Савельев – Москва, «Наука», 1977. -416с.

7. Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие / Т.И. Трофимова – Москва, «Высшая школа», 1990.- 450 с.

#### **Дополнительная литература**

1. Зисман Г.А., Годес О.М. Молекулярная физика. Курс общей физики, Т.І: учебное пособие для студентов втузов / Г.А. Зисман, О.М. Годес – Москва, «Наука», 1970.-490с.

2. Савельев И.В. Курс общей физики, Т.ІІІ: учебное пособие / И.В. Савельев, Москва, «Наука», 1987. – 320с.

3. Ноздрев В.Ф., Сенкевич А.А. Курс статистической физики: учебное пособие / В.Ф.Ноздрев, Москва, «Высшая школа», 1969. – 287с.

4. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе: пер с англ. Ю.Г.Рудого / П.Эткинс, Москва, «Мир», 1987. – 224с.

5. Василевский А.С., Мултановский В.В. Статистическая физика и термодинамика: учебное пособие / А.С.Василевский – Москва, «Просвещение», 1985. – 256с.

6. Гельфер Я.М. История и методология термодинамики и статистической физики: учебное пособие для студентов физических специальностей / Я.М. Гельфер – Москва, «Высшая школа», 1981. – 536с.

7. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, Т.4:пер. с англ. /Р. Фейнман – Москва, «Мир», 1965. – 261с.

8. Иродов И.В. Задачи по общей физике: учебное пособие /И.В. Иродов – Москва, «Наука», 2004.-416с.

9. Сборник задач по общему курсу физики: учебное пособие для вузов. В трех частях. Ч.1. Механика, Термодинамика и молекулярная физика. / Под ред. В.А. Овчинкина. – Москва; Изд-во МФТИ, 1998. – 416с.

10. Савельев И.В.Сборник вопросов и задач по общей физике: учебное пособие / И.В.Савельев – Москва, «Наука», 1988. – 288с.

11. Сахаров Д.И. Сборник задач по физике: учебное пособие / Москва, «Просвещение», 1967. – 285с.

12. Бабаджан Е.И., Гервидс В.И., Дубовик В.М., Нерсесов Э.А. Сборник качественных вопросов и задач по физике: учебное пособие / Е.И. Бабаджан – Москва, «Наука», 1990. – 386с.

#### **Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

1. [www.lectoriy.mipt.ru...](http://www.lectoriy.mipt.ru...)
2. [www.window.edu.ru](http://www.window.edu.ru)
3. [www.dic.academic.ru](http://www.dic.academic.ru)

#### **Перечень информационных технологий и программного обеспечения**

Blackboard ДВФУ.

## I. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

*Содержание методических указаний включает:*

- рекомендации по планированию и организации времени, отведенного на изучение дисциплины;
- описание последовательности действий студента, или алгоритм изучения дисциплины;
- рекомендации по работе с литературой;
- методические указания к выполнению лабораторных работ
- методические указания к решению задач.

## II. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### *Оборудование*

Измерительное кольцо  
для определения поверхностного натяжения  
Базовая установка системы Кобра3  
Источник питания, 12 В  
Информационный кабель типа RS 232 1  
Программное обеспечение  
для датчика Силы/Тесла системы Кобра3  
Измерительный модуль, Ньютон  
Датчик Ньютона  
Прямоугольный зажим «PASS»  
Треножник «PASS»  
Стержень штативный «PASS», прямоугольный,  
l = 250 мм  
Лабораторная подъемная платформа,  
160 x 130 мм  
Чашка Петри, d = 200 мм, стекло  
ПК с системой Windows® 95 или выше  
Аппарат для изучения кинетической теории газов  
Источник питания, регул., 15 В перем. ток / 12 В пост. ток / 5 А  
Световой барьер со счетчиком  
Источник питания 5 В пост. ток / 2,4 А  
Стробоскоп с цифровым индикатором  
Секундомер, цифровой  
Стеклянные шарики, d=2 мм, 10000 шт.  
Стальные шарики, d=2 мм, 1000 шт.  
Треножник «ПАСС»  
Штатив «ПАСС», прямоугольный, l=400 мм  
Прямоугольный зажим «ПАСС»  
Соединительный шнур, 750 мм, красный  
Соединительный шнур, 750 мм, синий  
Вискозиметр с падающим  
шариком  
Термометр, 24..+51°С, для  
вискозиметра с падающим

шариком  
Погружной термостат ТС10  
Набор приспособлений для  
термостата  
Ванна для термостата, макролон  
Подставка под реторту, 210x130  
мм, h=750 мм  
Универсальный зажим с  
шарниром  
Пикнометр, калиброванный, 25 мл  
Мерная колба, 100 мл, NS12/21  
Мензурка, высокая, 150 мл,  
стеклянная  
Мензурка, низкая, 250 мл,  
стеклянная  
Пипетки Пастера, l=145 мм, 250  
шт.  
Резиновые наконечники для  
пипеток, 10 шт.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ  
ОБУЧАЮЩИХСЯ  
по дисциплине «Молекулярная физика»**

**План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине**

№ п/п	Дата/сроки выполнения	Вид самостоятельной работы	Примерные нормы времени на выполнение	Форма контроля
1	3 неделя семестра	Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Законы идеального газа. – работа с лекциями, литературой, самостоятельное решение задач.	Две недели.	Контрольная работа по основным понятиям МКТ №1. Контрольная работа по решению задач №2.
2	5 неделя семестра	Подготовка к тестированию по теме: «МКТ идеального газа. Распределение Максвелла».	Две недели.	Тестирование №.1 (5 заданий)

3	6 неделя семестра	Решение индивидуальных задач по теме: «Распределение Максвелла, распределение Больцмана»	Две недели	Защита решений индивидуальных задач на консультации
4	7 и 8 недели семестра	Работа с лекциями, литературой, самостоятельное решение задач по теме: «Первое начало термодинамики и его применение к изопрцессам»	В течении двух недель	Контрольная работа по теории № 3. Контрольная работа по решению задач №4.
5	9 неделя семестра	Подготовка к тестированию по теме: «Распределение Максвелла-Больцмана. Общая теория процессов переноса в газах»	Три недели	Тестирование №2 (5 заданий)

6	10 и 11 недели семестра	Подготовка к тестированию по теме: «Первое начало термодинамики. Классическая теория теплоемкости. Элементы квантовой теории теплоемкости».	Три недели	Тестирование №3. (5 заданий)
7	12 неделя семестра	Решение индивидуальных задач по теме: «Расчет к.п.д. идеальных тепловых машин»	Две недели	Защита решений индивидуальных задач на консультации
8	13 неделя семестра	Подготовка к контрольной работе по теме: «Энтропия. Термодинамический и статистический смысл энтропии»	Одна неделя	Контрольная работа №5 (теория)

9	14 и 15 недели семестра	Работа с лекциями, литературой, методическими указаниями по теме «Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса». Самостоятельное решение задач.	Две недели	Контрольная работа по решению задач №6.
10	16 неделя семестра	Подготовка к тестированию по теме «Второе начало термодинамики. Реальные газы. Фазовые равновесия и фазовые превращения».	Две недели	Тестирование №4 (5заданий)
11	17 неделя семестра	Работа с лекциями, литературой, методическими указаниями по теме «Термодинамические функции и условия термодинамической устойчивости»	Одна неделя	Контрольная работа по теории №7

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ  
по дисциплине «Молекулярная физика»**

<b>Код и формулировка компетенции</b>	<b>Этапы формирования компетенции</b>	
УПК-1.1 способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач	Знает	Основы молекулярно-кинетической теории вещества и идеального газа как простейшей модели вещества, статистический и динамический методы, принципы термодинамики, виды состояний термодинамических систем, фазовые состояния и фазовые переходы, соотношения Максвелла и функции Гиббса-Гельмгольца.
	Умеет	Применять статистический и термодинамический методы к решению фундаментальных задач молекулярной физики: выводить основное уравнение МКТ, основное уравнение состояния идеального газа, распределение Максвелла, Больцмана, Максвелла-Больцмана, формулу Эйнштейна-Смолуховского, законы процессов переноса в газах и жидкостях; рассчитать работу идеальной тепловой машины, получить уравнения всех изопроцессов и политропных процессов, на основе теорем Клаузиуса формулировать второе начало термодинамики и закон возрастания энтропии, выводить формулу Больцмана, уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов, эффект Джоуля-Томсона, уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
	Владеет	Знаниями, умениями, навыками уровня молекулярной физики для решения физических задач как теоретических, так и экспериментальных.
ПК-6 способностью применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин	Знает	Теоретически знакомится с современными методами обработки, синтеза и анализа проведения эксперимента.
	Умеет	Сравнивать традиционные методы проведения эксперимента в условиях учебных лабораторий с современными методами в научных лабораториях, составление отчетов по проделанной лабораторной работе с написанием научных работ.
	Владеет	Указанным сравнительным анализом для понимания правильного изложения решения экспериментальных задач в будущей деятельности при проведении научных физических исследований.
ПК-7 способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в	Знает	Теоретические и практические задачи и темы «Молекулярной физики», необходимые для учебного процесса в общеобразовательных учреждениях общего образования. К наиболее важным темам здесь относятся: молекулярно-кинетическая теория вещества и идеального газа, насыщенные, ненасыщенные пары и влажность, первое начало термодинамики, капиллярные явления и т.д.



избранной области физических исследований	Умеет	Излагать и решать как теоретические, так и экспериментальные (демонстрационные) задачи, входящие в курс элементарной физики, изучаемой в общеобразовательных учреждениях.
	Владеет	Современными методами и методологией изложения и решения как теоретических, так и экспериментальных (демонстративных) задач.

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства		
			текущий контроль	промежуточная аттестация	
1.	Агрегатные состояния вещества и их признаки	УПК-1.1; УК-1.1	знает характеристики молекул и количества вещества	Контрольная работа по теории №1	Экзаменационные вопросы 1-3
			Умеет формулировать физический смысл понятий и величин, решать простейшие задачи	Устный опрос и отчет по лабораторной работе №2.12, №2.14	Тестирование №1
			владеет методами моделирования состояния вещества, его математическим описанием и физическим объяснением	Контрольная работа по решению задач №2	Тестирование №1
2.	Молекулярно-кинетическая теория вещества, молекулярно-кинетическая теория идеального газа	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> Основное уравнение МКТ, уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона), газовые законы и их графики <b>Умеет</b> выводить уравнения МКТ и уравнение состояния идеального газа, формулировать физический смысл уравнений и	Дом. Задание: решение задач №2.7-2.13 по сб. задач (И.Е.Иродов), отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.2	Экзаменационные вопросы 4-7 Тестирование №1

			законов <b>Владеет</b> дифференциальными и интегральными методами для решения задач по МКТ		
3.	Распределение Максвелла. Распределение Больцмана и барометрическая формула. Распределение Максвелла-Больцмана. Броуновское движение и формула Эйнштейна-Смолуховского.	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> элементы теории вероятности, основные физические идеи выводов данных распределений, формулы распределений. <b>Умеет</b> выводить данные распределения, анализировать полученные результаты <b>Владеет</b> статистическим методом для решения задач	Устная защита решений индивидуальных задач; Отчеты и теоретический опрос по лабораторным работам №2.5, №2.6, отчет по зачетным задачам	Экзаменационные вопросы 8-16 Тестирование №1
4.	Эффективный диаметр и эффективное сечение молекул. Среднее число столкновений и длина свободного пробега. Неравновесные процессы и явления переноса (диффузия, вязкость и теплопроводность).	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> определения и формулы данных характеристик, Законы диффузии, вязкости и теплопроводности, коэффициенты процессов переноса и их связь. <b>Умеет</b> выводить законы процессов переноса, моделировать процессы переноса, объяснять физический смысл законов. <b>Владеет</b> знанием и умением работать с данными вопросами в решении задач.	Отчеты и теоретические опросы по лабораторным работам №2.1, №2.10, №2.18, отчеты по решению зачетных задач	Экзаменационные вопросы 17-21 Тестирование №2
5.	Нулевое и первое начало термодинамики. Теплота и работа. Внутренняя	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> физический смысл первых начал или принципов термодинамики,	Контрольная работа по теории №3,	Экзаменационные вопросы 22-26 Тестирование №3

	энергия и энтальпия. Число степеней свободы. Адиабатный и политропный процессы.		определения и формулы всех понятий в данной теме, уравнения адиабатного и политропного процессов. <b>Умеет</b> выводить первое начало термодинамики, рассчитывать теплоту, работу и внутреннюю энергию идеального газа для всех изопроцессов. <b>Владеет</b> термодинамическим методом для решения задач по первому началу термодинамики.	контрольная работа по решению задач №4, отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.17, отчет по решению зачетных задач	
6.	Классическая теория теплоемкости газов и твердых тел (теория Дюлонга-Пти). Элементы квантовой теории теплоемкости твердых тел (теория Эйнштейна и теория Дебая).	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> общие положения классической и квантовой теории теплоемкости; формулы законов и их физический смысл. <b>Умеет</b> выводить закон Дюлонга-Пти, формулу Эйнштейна, закон Дебая; анализировать выводы и полученные результаты. <b>Владеет</b> полученными навыками в решении физических задач	Контрольная работа по теории, отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.4	Экзаменационные вопросы 27-28 Тестирование №3
7.	Второе начало термодинамики. Теоремы Карно. Теоремы Клаузиуса. Энтропия и ее термодинамический смысл в идеальном обратимом	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> определения всех термодинамических процессов; математический и физический смысл теорем Карно и Клаузиуса, термодинамический и статистический	Контрольная работа по теории №5, контрольная работа по решению задач №6,	Экзаменационные вопросы 29-33 Тестирование №4

	<p>процессе. Статистический смысл второго начала термодинамики, формула Больцмана.</p>		<p>смысл энтропии, закон возрастания энтропии, формулу Больцмана. <b>Умеет</b> определять к.п.д. идеальных обратимых процессов Карно, Отто, Дизеля; из теорем Клаузиуса выводить термодинамический смысл энтропии; выводить формулу Больцмана и анализировать полученные результаты. <b>Владеет</b> полученными навыками в решении теоретических и экспериментальных задач.</p>	<p>отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.</p>	
8.	<p>Реальные газы. Экспериментальные и теоретические изотермы реальных газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Метастабильные состояния. Критическое состояние системы и его параметры.</p>	<p>УПК-1.1; УК-1.1</p>	<p><b>Знает</b> основные признаки состояния реального газа; отличие экспериментальных изотерм от теоретических изотерм; уравнение Ван-дер-Ваальса и физический смысл постоянных уравнения Ван-дер-Ваальса; основные характеристики метастабильного и критического состояния реального газа. <b>Умеет</b> анализировать как экспериментальные, так и теоретические изотермы; выводить уравнение состояния реального газа и</p>	<p>Отчет по решению зачетных задач, Устный опрос по теории.</p>	<p>Экзаменационные вопросы 34-35 Тестирование №4</p>

			определять его физический смысл; <b>Владеет</b> знаниями и навыками для решения экспериментальных и теоретических задач.		
9.	Молекулярные силы в жидкостях. Явления на границе жидкости. Смачивание и несмачивание. Капиллярные явления, формула Лапласа.	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> отличие действия межмолекулярных сил взаимодействия в газах, жидкостях и твердых телах; механизм возникновения поверхностного натяжения и давления под изогнутой поверхностью жидкости; условия смачивания и несмачивания; капиллярные явления и формулу Лапласа. <b>Умеет</b> выводить поверхностную энергию, давление под изогнутой поверхностью жидкости, формулы условий смачивания и несмачивания, формулу Лапласа; анализировать полученные результаты. <b>Владеет</b> знаниями, умениями, навыками для решения экспериментальных и теоретических задач.	Отчет по теории и эксперименту лабораторной работы №2.3, №2.7	Экзаменационные вопросы 37-39 Тестирование №4
10.	Фазовые равновесия и фазовые переходы. Диаграммы состояния. Тройная точка.	УПК-1.1; УК-1.1	<b>Знает</b> диаграммы состояния и критические точки на ней; определения фазовых переходов первого и второго	Отчет по теории и эксперименту лабораторной работы	Экзаменационные вопросы 31, 39 Контрольная работа

	<p>Фазовые переходы первого и второго рода. Зависимость температуры фазового перехода от давления. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.</p>		<p>рода; уравнение Клапейрона-Клаузиуса и его физический смысл. <b>Умеет</b> анализировать диаграммы состояния и определять на них фазовые переходы; анализировать зависимость температуры фазового перехода от давления в уравнении Клапейрона-Клаузиуса. <b>Владеет</b> полученными знаниями, умениями, навыками в решении экспериментальных и теоретических задач.</p>	<p>№2.12, устный опрос по теории.</p>	
11.	<p>Термодинамическое или характеристическое функции. Соотношения Максвелла. Уравнения Гиббса-Гельмгольца.</p>	<p>УПК-1.1; УК-1.1</p>	<p><b>Знает</b> пять функций состояния: <math>T, P, V, S, U</math>; четыре соотношения Максвелла; четыре характеристических функций и соответствующие им уравнения Гиббса-Гельмгольца; первое и второе <math>TdS</math>-уравнения. <b>Умеет</b> получать соотношения Максвелла; выводить уравнения Гиббса-Гельмгольца; выводить первое и второе <math>TdS</math> – уравнения/ <b>Владеет</b> полученными знаниями, умениями,</p>	<p>Устный опрос по теории, отчет по решению зачетных задач.</p>	<p>Экзаменационные вопросы 40 Контрольная работа</p>

			<p>навыками для определения теплоемкостей в обобщенном уравнении термодинамики; для вывода внутренней энергии реального газа, <math>(c_p - c_v)</math> реального газа, <math>\frac{c_p}{c_v}</math> реального газа, для вычисления энтропии реального газа.</p>		
12.	<p>Эффект Джоуля-Томсона. Термодинамика эффекта Джоуля-Томсона. Кривая инверсии дифференциального эффекта Джоуля-Томсона. Интегральный эффект Джоуля-Томсона.</p>	<p>УПК-1.1; УК-1.1</p>	<p><b>Знает</b> основные положения физики эффекта Джоуля-Томсона; дифференциальное уравнение кривой инверсии и его характеристики; изоэнтальпийную кривую; температуру инверсии; интегральную кривую инверсии. <b>Умеет</b> получить и проанализировать изоэнтальпийный процесс; выводить дифференциальное уравнение кривой инверсии, анализировать кривую инверсии; выводить температуру инверсии в эффекте Джоуля-Томсона. <b>Владеет</b> знаниями, умениями, навыками для решения экспериментальных и теоретических задач.</p>	<p>Отчет по решению зачетных задач, устный опрос по теории</p>	<p>Экзаменационные вопросы 36</p> <p>Контрольная работа</p>

## Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		Критерии	Показатели
<p>УПК-1.1 способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач</p>	<p>знает (пороговый уровень)</p>	<p>Основы молекулярно-кинетической теории вещества и идеального газа как простейшей модели вещества, статистический и динамический методы, принципы термодинамики, виды состояний термодинамических систем, фазовые состояния и фазовые переходы, соотношения Максвелла и функции Гиббса-Гельмгольца.</p>	<p>Знание основ молекулярно-кинетической теории вещества и идеального газа как простейшей модели вещества, статистический и динамический методы, принципы термодинамики, виды состояний термодинамических систем, фазовые состояния и фазовые переходы, соотношения Максвелла и функции Гиббса-Гельмгольца.</p>	<p>Способность сформулировать основные положения молекулярно-кинетической теории вещества и идеального газа как простейшей модели вещества, статистический и динамический методы, принципы термодинамики, виды состояний термодинамических систем, фазовые состояния и фазовые переходы, соотношения Максвелла и функции Гиббса-Гельмгольца.</p>



	<p>умеет (продвину- тый)</p>	<p>Применять статистический и термодинамический методы к решению фундаментальных задач молекулярной физики: выводить основное уравнение МКТ, основное уравнение состояния идеального газа, распределение Максвелла, Больцмана, Максвелла-Больцмана, формулу Эйнштейна-Смолуховского, законы процессов переноса в газах и жидкостях; рассчитать работу идеальной тепловой машины, получить уравнения всех изопроцессов и политропных процессов, на основе теорем Клаузиуса формулировать второе начало термодинамики и закон возрастания энтропии, выводить формулу Больцмана, уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов, эффект Джоуля-Томсона, уравнение Клапейрона-Клаузиуса.</p>	<p>умение на основе физических законов решать задачи; умение использовать методы и приемы проведения физического эксперимента и способы обработки экспериментальных данных; умение применять логические приемы мышления - анализ и синтез при решении задач; научно обосновывать принимаемые методы решения профессиональных задач</p>	<p>способность решить задачу, воспользовавшись основными физическими законами; способность провести физический эксперимент и осуществить обработку экспериментальных данных; научно обосновывать принимаемые методы решения профессиональных задач</p>
	<p>владеет (высокий)</p>	<p>Знаниями, умениями, навыками уровня молекулярной физики для решения физических задач как теоретических, так и экспериментальных.</p>	<p>владение навыками выбора оптимального пути решения задач и приемов проведения физического эксперимента и способов обработки экспериментальных данных с использованием вычислительных программ;</p>	<p>способность произвести выбор оптимального способа решения задач, способность использования вычислительных программ при обработке экспериментальных данных при проведении физического эксперимента;</p>

ПК-6 способность ю применять на практике профессиона льные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин	знает (порогов ый уровень)	Основные методы и приемы проведения физического эксперимента, и элементарные способы обработки экспериментальных данных; устройство и принципы действия физических приборов и элементов; наиболее важные и фундаментальные достижения физической науки; связь физики с техникой, производством, другими науками	Умеет на основе знаний устройства и принципов действия физических приборов и элементов, знаний приемов проведения эксперимента провести эксперимент	Способен подготовиться к проведению учебного эксперимента и выполнить его с соблюдением методики
	умеет (продвину тый)	Формулировать цель практической работы, составлять отчет по проделанной работе, анализировать ход работы и делать соответствующие выводы.	Умеет формулировать цель практической работы, составлять отчет по проделанной работе	Способен анализировать ход экспериментальной работы и делать соответствующие выводы
	владеет (высокий)	Методикой и методологией проведения эксперимента с помощью методических указаний, лекций, учебников и ресурсов интернета.	Умеет пользоваться методическими указаниями, учебниками и ресурсами интернета при подготовке к проведению эксперимента	Способен провести эксперимент владея методикой и методологией проведения эксперимента

<p>ПК-7  способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований</p>	<p>знает  (пороговый уровень)</p>	<p>Основы молекулярно-кинетической теории вещества и идеального газа как простейшей модели вещества, статистический и динамический методы, принципы термодинамики, виды состояний термодинамических систем, фазовые состояния и фазовые переходы, соотношения Максвелла и функции Гиббса-Гельмгольца.</p>	<p>Знание основ молекулярно-кинетической теории вещества и идеального газа как простейшей модели вещества, статистический и динамический методы, принципы термодинамики, виды состояний термодинамических систем, фазовые состояния и фазовые переходы, соотношения Максвелла и функции Гиббса-Гельмгольца.</p>	<p>Способность сформулировать основные положения молекулярно-кинетической теории вещества и идеального газа как простейшей модели вещества, статистический и динамический методы, принципы термодинамики, виды состояний термодинамических систем, фазовые состояния и фазовые переходы, соотношения Максвелла и функции Гиббса-Гельмгольца.</p>
--	---------------------------------------	---	---	--

<p>умеет (продвину- тый)</p>	<p>Применять статистический и термодинамический методы к решению фундаментальных задач молекулярной физики: выводить основное уравнение МКТ, основное уравнение состояния идеального газа, распределение Максвелла, Больцмана, Максвелла-Больцмана, формулу Эйнштейна-Смолуховского, законы процессов переноса в газах и жидкостях; рассчитать работу идеальной тепловой машины, получить уравнения всех изопроцессов и политропных процессов, на основе теорем Клаузиуса формулировать второе начало термодинамики и закон возрастания энтропии, выводить формулу Больцмана, уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов, эффект Джоуля-Томсона, уравнение Клапейрона-Клаузиуса.</p>	<p>умение на основе физических законов решать задачи; умение использовать методы и приемы проведения физического эксперимента и способы обработки экспериментальных данных; умение применять логические приемы мышления - анализ и синтез при решении задач; научно обосновывать принимаемые методы решения профессиональных задач</p>	<p>способность решить задачу, воспользовавшись основными физическими законами; способность провести физический эксперимент и осуществить обработку экспериментальных данных; научно обосновывать принимаемые методы решения профессиональных задач</p>
<p>владеет (высокий)</p>	<p>Знаниями, умениями, навыками уровня молекулярной физики для решения физических задач как теоретических, так и экспериментальных.</p>	<p>владение навыками выбора оптимального пути решения задач и приемов проведения физического эксперимента и способов обработки экспериментальных данных с использованием вычислительных программ;</p>	<p>способность произвести выбор оптимального способа решения задач, способность использования вычислительных программ при обработке экспериментальных данных при проведении физического эксперимента;</p>

# Методические рекомендации, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины

## Оценочные средства для промежуточной аттестации

### Вопросы к экзаменационным билетам.

1. Молекулярно-кинетическая теория вещества. Характеристики молекул и количества вещества и связи между ними.
2. Постоянные Авогадро и Лошмидта. Тепловое движение молекул. Потенциальная кривая межмолекулярного взаимодействия.
3. Агрегатные состояния вещества и их признаки. Статистический и термодинамический методы в молекулярной физике.
4. Эмпирические газовые законы, расширение твердых тел. Идеальный газ. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа.
5. Давление идеального газа. Вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа.
6. Температура и ее физический (статистический) смысл в молекулярно-кинетической теории. Теплообмен и термодинамическое равновесие, термометрическое свойство и термометрическая величина. Термодинамическая шкала температур.
7. Вывод уравнения состояния идеального газа на основе молекулярно-кинетической теории. Изопродессы. Изотермический коэффициент сжимаемости, температурные коэффициенты объемного расширения и давления.
8. Скорости молекул газа. Измерение скоростей молекул газа (опыт Штерна, метод молекулярных пучков).
9. Элементы теории вероятности: случайные события и случайные величины, частота и вероятность, дискретное и непрерывное распределение вероятности, плотность вероятности, условие нормировки, теоремы сложения и умножения, средние значения случайных величин, флуктуации.
10. Распределение Максвелла. Вывод функции распределения молекул по проекциям скоростей. График функции распределения молекул по проекциям скоростей.
11. Распределение Максвелла. Вывод функции распределения молекул по абсолютным значениям скоростей. Геометрическое истолкование полученной функции.
12. Распределение Максвелла в приведенном виде. Характерные скорости молекул в распределении Максвелла: наивероятнейшая скорость, средняя и средняя квадратичная скорости, средняя скорость по проекции, среднее значение модуля проекции скорости, средняя относительная скорость. Связь между характерными скоростями.
13. Закон Паскаля и вывод барометрической формулы. Распределение Больцмана и закон Больцмана (вывод).
14. Распределение Максвелла по кинетическим энергиям. Связь между распределениями Максвелла и Больцмана. Распределение Максвелла-

- Больцмана. Распределение Больцмана для дискретного спектра значений энергии.
15. Броуновское движение. Расчет среднего квадрата смещения броуновской частицы (вывод формулы Смолуховского-Эйнштейна).
  16. Элементы молекулярно-кинетической теории неравновесных процессов: равновесное и неравновесное состояния, процессы релаксации и процессы переноса.
  17. Эффективный диаметр и эффективное сечение молекул газа. Вывод средней длины свободного пробега и распределение свободных пробегов частиц.
  18. Потенциальная кривая межмолекулярного взаимодействия и зависимость эффективного диаметра и средней длины свободного пробега молекул от температуры и давления для газов и жидкостей.
  19. Общая теория процессов переноса в газах. Диффузия и самодиффузия. Коэффициент диффузии и его зависимость от температуры и давления.
  20. Общая теория процессов переноса в газах. Вязкость или внутреннее трение. Коэффициент вязкости и его зависимость от температуры и давления.
  21. Общая теория процессов переноса в газах. Теплопроводность. Коэффициент теплопроводности и его зависимость от температуры и давления.
  22. Нулевое начало термодинамики. Термодинамические процессы: равновесные или квазистатические, обратимые и необратимые, круговые или циклические.
  23. Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия, работа и теплота. Принцип эквивалентности теплоты и работы.
  24. Теплоемкость тела, удельная и молярная теплоемкости. Теплоемкость газа при постоянном объеме и постоянном давлении. Энтальпия. Число степеней свободы. Вывод уравнения Роберта-Майера.
  25. Адиабатный процесс. Вывод уравнения Пуассона. Работа при адиабатном процессе.
  26. Политропный процесс. Вывод уравнения политропы и его анализ.
  27. Классическая теория теплоемкости газов и твердых тел. Закон Дюлонга-Пти. Недостатки классической теории теплоемкости.
  28. Элементы квантовой теории теплоемкости твердых тел. Теория и формула Эйнштейна. Теория и закон Дебая. Температура Дебая и ее физический смысл.
  29. Второе начало термодинамики. Обратимые и необратимые процессы. Формулировки второго начала термодинамики Клаузиуса, Кельвина и Планка. КПД тепловой и холодильной машины.
  30. Идеальный обратимый (квазистатический) процесс. Цикл Карно. Вывод работы и КПД цикла Карно.
  31. Теорема Клаузиуса о приведенной теплоте. Энтропия и ее термодинамический смысл в идеальном обратимом процессе.
  32. Математическое описание квазистатических изопроцессов на основе второго начала термодинамики. T-S диаграммы.

33. Статистический смысл второго начала термодинамики. Вывод формулы Больцмана для энтропии. Закон возрастания энтропии Клаузиуса. Энтропия необратимых процессов.
34. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Расчет поправок на объем и давление реального газа. Физический смысл постоянных в уравнении Ван-дер-Ваальса.
35. Теоретические изотермы реального газа Ван-дер-Ваальса. Критическое состояние вещества и критические параметры состояния вещества. Опалесценция. Закон соответственных состояний.
36. Эффект Джоуля-Томсона. Внутренняя энергия реального газа. Термодинамика эффекта Джоуля-Томсона. Расчет дифференциального эффекта Джоуля-Томсона. Интегральный эффект Джоуля-Томсона.
37. Явление кривизны поверхности жидкости. Поверхностная энергия и поверхностное натяжение. Давление под изогнутой поверхностью.
38. Смачивание и несмачивание. Капиллярные явления. Формула Лапласа.
39. Фазовые равновесия и фазовые переходы. Зависимость температуры фазового перехода от давления. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Диаграммы фазовых состояний. Тройная точка.
40. Характеристические функции. Соотношения Максвелла. Уравнения Гиббса-Гельмгольца. Первое и второе TdS.

### Образец экзаменационного билета

#### Экзаменационный билет № 1

1. Молекулярно-кинетическая теория вещества. Характеристики молекул и количества вещества и связи между ними.
2. Общая теория процессов переноса в газах. Теплопроводность. Коэффициент теплопроводности и его зависимость от температуры и давления.

#### Критерии выставления оценки на экзамене по дисциплине «Молекулярная физика»

Баллы	Оценка экзамена	Требования к сформированным компетенциям
86-100	«отлично»	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил основное содержание дисциплины, владеет техникой вывода физических формул, обладает устойчивыми навыками решения физических задач, умеет применять естественнонаучные законы для решения профессиональных задач.
75-85	«хорошо»	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твердо знает материал, владеет культурой устной и письменной речи, имеет незначительные замечания по существу изложения материала или решению задач (неполный вывод формулы или замечания по решению задач).

61-74	«удовлетворительно»	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он обладает знаниями основного материала, но при этом не владеет техникой вывода физических формул, не обладает устойчивыми навыками решения физических задач.
Менее 61	«неудовлетворительно»	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не освоил компетенцию (ОПК-1): не знает значительной части программного материала по физике, допускает существенные ошибки при решении задач, не обладает навыками применять естественнонаучные законы для решения профессиональных задач.

### Оценочные средства текущей аттестации

#### Тестирование №2

#### Тема «Распределения Максвелла и Больцмана. Общая теория процессов переноса»

*Указание: максимальное число баллов за каждый вариант тестов 55 баллов; число баллов на зачет  $\geq 30$ .*

#### Вариант 1

Теоретический вопрос:

Распределение Максвелла. Вывод функции распределения молекул по абсолютным значениям скоростей. График функции распределения молекул по абсолютным значениям скоростей и его анализ. (20 баллов)

Тестовые вопросы:

1. С помощью распределение Максвелла рассчитайте среднюю относительную скорость теплового движения молекул идеального газа и сравните ее со средней скоростью. (5 баллов)
2. Что в молекулярной физике называется столкновением молекул? Дайте определение эффективному диаметру и эффективному сечению молекул. (5 баллов)
3. На чем основан вывод общего уравнения процессов переноса? (5 баллов)
4. Какие процессы в молекулярной физике называются релаксационными? Время релаксации и его определение. (5баллов)
5. Сформулируйте физический смысл закона Больцмана. (5 баллов)

#### Вариант 2

Теоретический вопрос:

Барометрическая формула (вывод). Распределение Больцмана и закон Больцмана. Распределение Максвелла-Больцмана. (20 баллов)



Тестовые вопросы:

1. С помощью распределения Максвелла рассчитайте среднюю квадратичную скорость теплового движения молекул идеального газа. (5 баллов)
2. Что в молекулярной физике называют броуновским движением. Сформулируйте физический смысл формулы Смолуховского-Эйнштейна. (5 баллов)
3. Перечислите виды процессов переноса, запишите их уравнения и укажите причины их возникновения. (5 баллов)
4. Получите распределение свободных пробегов молекул. Что устанавливает это распределение? (5 баллов)
5. Чем различаются механизмы столкновений молекул идеального газа и реального газа? Определите понятие столкновения. (5 баллов)

### Вариант 3

Теоретический вопрос:

Броуновское движение. Расчет среднего квадрата смещения броуновской частицы (вывод формулы Смолуховского-Эйнштейна). (20 баллов)

Тестовые вопросы:

1. С помощью распределения Максвелла рассчитайте среднюю скорость теплового движения молекул идеального газа. (5 баллов)
2. Как зависит средняя длина свободного пробега молекулы от температуры для газов и жидкостей? Ответ обосновать. (5 баллов)
3. Какие явления носят общее название – «явления переноса»? Почему они имеют общее название? (5 баллов)
4. Запишите распределение Больцмана и определите его физический смысл. (5 баллов)
5. Нарисуйте график зависимости функции распределения молекул по абсолютным скоростям от скорости. Что является особенностью этого графика? Что считает функция распределения молекул по абсолютным скоростям? (5 баллов)

### Вариант 4

Теоретический вопрос:

Эффективный диаметр и эффективное сечение молекул газа. Вывод средней длины свободного пробега молекул газа и распределения свободных пробегов молекул газа. (20 баллов)

Тестовые вопросы:

1. С помощью распределения Максвелла рассчитайте среднюю скорость по проекции теплового движения молекул идеального газа. (5 баллов)
2. Как экспериментально измеряются скорости теплового движения молекул газа? (Опыт Штерна или метод молекулярных пучков). (5 баллов)
3. Выведите барометрическую формулу и определите ее физический смысл. (5 баллов)

4. При каких условиях возникают процессы релаксации и процессы переноса в газах и жидкостях? (5 баллов)
5. Запишите распределение Больцмана для дискретного ряда значений энергии частиц и определите его физический смысл. (5 баллов)

### Вариант 5

Теоретический вопрос:

Потенциальная кривая межмолекулярного взаимодействия и зависимость эффективного диаметра, эффективного сечения и средней длины свободного пробега молекул от температуры и давления для газов и жидкостей. (20)

Тестовые вопросы;

1. С помощью распределения Максвелла рассчитайте среднее значение модуля проекции скорости теплового движения молекул идеального газа. (5 баллов)
2. Дайте определения термодинамическому равновесному и неравновесному состояниям системы. (5 баллов)
3. Изобразите графически распределения Максвелла по абсолютным скоростям для двух температур  $T_1 \neq T_2$  и объясните полученный результат. (5 баллов)
4. Что называется броуновским движением? (5 баллов)
5. Чем отличаются механизмы переноса физической величины в газах и жидкостях? (5 баллов)

### Вариант 6

Теоретический вопрос:

Термодинамическое неравновесное состояние системы: релаксационные процессы и явления переноса. Общая теория процессов переноса в газах. Вывод общего уравнения процесса переноса на основе молекулярно-кинетической теории. (20 баллов)

Тестовые вопросы:

1. С помощью распределения Максвелла рассчитайте наивероятнейшую скорость теплового движения молекул идеального газа. (5 баллов)
2. Что устанавливает распределение Максвелла-Больцмана? (5 баллов)
3. Как зависит эффективный диаметр и эффективное сечение молекул от температуры для газов и жидкостей? (5 баллов)
4. Изобразите графически распределение Максвелла по абсолютным скоростям, укажите характерные скорости и их соотношения. (5 баллов)
5. Запишите барометрическую формулу и определите ее физический смысл. (5 баллов)

**II. Максимальное количество баллов за решение индивидуальной задачи – 20. Зачтено ставится при количестве баллов  $\geq 10$ , не зачтено – при количестве баллов  $< 10$ .**

III. Максимальное количество баллов за контрольную работу по теории – 20. Зачтено ставится при количестве баллов  $\geq 10$ , не зачтено – при количестве баллов  $< 10$ .

IV. Максимальное количество баллов за контрольную работу по решению задач (2 задачи) – 20. Зачтено ставится при количестве баллов  $\geq 15$ , не зачтено – при количестве баллов  $< 15$ .

V. Дополнительные вопросы и задачи для самостоятельной работы при подготовке к экзамену (ответ на каждый вопрос оценивается по пятибалльной шкале):

- Выведите формулу связи между коэффициентом линейного  $\alpha$  и объемного  $\beta$  расширения однородного и изотропного тела.
- Выведите формулу для зависимости плотности  $\rho$  однородного и изотропного тела от его температуры.
- Выведите формулу для работы идеального газа в адиабатическом процессе.
- Выведите уравнение политропного процесса идеального газа.
- Выведите формулу для работы идеального газа в политропном процессе.
- Выведите формулу зависимости показателя адиабаты  $\gamma$  от числа атомов  $n$  в многоатомной молекуле в рамках классической теории теплоемкости.
- Объясните, почему молярная теплоемкость при постоянном объеме газа  $SO_2$  больше, чем у некоторых других многоатомных газов, таких как  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ?
- Объясните, почему значение молярной теплоемкости  $c_v$  для двухатомных и многоатомных газов увеличивается с ростом их молекулярного веса?
- Вычислите и сравните кинетическую энергию поступательного и вращательного движения молекулы  $O_2$  при нормальных условиях (среднее расстояние между атомами  $l = 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ , угловая скорость вращения  $\omega_z = 2,0 \cdot 10^{12} \text{ рад/с}$ ).
- Выведите формулу для коэффициента полезного действия цикла Отто.
- Докажите, что теплоемкости тел  $c_p(T)$  и  $c_v(T)$  стремятся к нулю при стремлении температуры к абсолютному нулю  $T \rightarrow 0$ .
- Выведите формулу для внутренней энергии тонкой мыльной пленки.
- Найти постоянные уравнения Ван-дер-Ваальса  $a_\mu$  и  $b_\mu$  для азота, если  $T_{кр} = 149,9^\circ \text{C}$ ,  $P_{кр} = 33,55 \text{ атм}$ .
- Принимая постоянную  $a_\mu$  Ван-дер-Ваальса для воды равной  $5,45 \cdot 10^6 \text{ атмс м}^6 / \text{моль}^2$ , найдите внутреннее давление воды.

- Выведите формулу для постоянных  $A$  и  $a$  линейной функции плотности вероятности  $\varphi(v_x)$ .
- Выведите формулу для наиболее вероятной  $v_{вер}$ , средней арифметической  $\langle v \rangle$  и средней квадратичной скорости  $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$  распределения Максвелла по абсолютному значению скорости молекул.

*Методические указания:*

### **Характеристические скорости теплового движения молекул идеального газа**

Интегралами Пуассона называются интегралы вида

$$\int_0^{\infty} e^{-\alpha x^2} x^{2n+1} dx$$

и

$$\int_0^{\infty} e^{-\alpha x^2} x^{2n} dx$$

Для вычисления обоих типов интегралов необходимо знать табличные значения для следующих двух интегралов:

$$I_1 = \int_0^{\infty} e^{-\alpha x^2} x dx = \frac{1}{2\alpha} \int_0^{\infty} e^{-t} dt = \frac{1}{2\alpha}$$

$$I_0 = \int_0^{\infty} e^{-\alpha x^2} dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}.$$

Для любого  $n=1,2,3\dots$  интегралы Пуассона имеют вид

$$I_{2n+1} = \int_0^{\infty} e^{-\alpha x^2} x^{2n+1} dx = \frac{n!}{2\alpha^{n+1}}$$

$$I_{2n} = \int_0^{\infty} e^{-\alpha x^2} x^{2n} dx = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2^{n+1}} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha^{2n+1}}}.$$

Распределение молекул идеального газа по абсолютным значениям скоростей при данных  $m_0$ -массе молекулы и  $T$ -температуре газа

$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}.$$

Распределение молекул идеального газа по значениям проекций скоростей

$$f(v_i) = \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{m_0 v_i^2}{2kT}}, \text{ где } i=x,y,z.$$

1. Определение среднего значения абсолютной скорости теплового движения молекул

$$\langle v \rangle = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} v^3 dv = \frac{4\pi}{\pi^{\frac{3}{2}}} \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{2\alpha^2} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{2} \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{-2} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$$

2. Определение средней квадратичной скорости теплового движения молекул

$$\langle v^2 \rangle = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} v^4 dv = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{3\sqrt{\pi}}{2^3 \alpha^2} = \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{3}{2} \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{-\frac{5}{2}} = \frac{3kT}{m_0},$$

очевидно, что  $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$

3. Определение среднего значения проекции скорости теплового движения

$$\begin{aligned} \langle v_i \rangle &= \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{m_0 v_i^2}{2kT}} v_i dv_i = \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{m_0 v_i^2}{2kT}} v_i dv_i + \int_0^{\infty} e^{-\frac{m_0 v_i^2}{2kT}} v_i dv_i \right\} = \\ &= \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ -\frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{2\alpha} \right\} = 0. \end{aligned}$$

4. Определение среднего модуля проекции скорости теплового движения

$$\langle |v_i| \rangle = \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} 2 \int_0^{\infty} e^{-\frac{m_0 v_i^2}{2kT}} v_i dv_i = \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} 2 \frac{1}{2\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{-1} = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m_0}},$$

очевидно, что  $\langle v \rangle = 2 \langle |v_i| \rangle$ .

5. Определение среднего квадрата проекции скорости теплового движения молекул

$$\langle v_i^2 \rangle = \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} 2 \int_0^{\infty} e^{-\frac{m_0 v_i^2}{2kT}} v_i^2 dv_i = \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} 2 \frac{\sqrt{\pi}}{2^2 \alpha^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{m_0}{2kT} \right)^{-\frac{3}{2}} = \frac{kT}{m_0}$$

очевидно, что  $\langle v^2 \rangle = 3 \langle v_i^2 \rangle$ .

6. Определение средней относительной скорости теплового движения молекул. Движение двух одноатомных молекул с массами  $m_1$  и  $m_2$  эквивалентно движению одной молекулы с приведенной массой

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}. \text{ Если } m_1 = m_2 = m_0, \text{ то приведенная масса равна } m = \frac{m_0}{2}.$$

Тогда функция распределения молекул идеального газа по относительным скоростям имеет вид

$$f(v_{отн}) = 4\pi \left( \frac{m_0}{4\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_0 v_{отн}^2}{4kT}} v_{отн}^2, \text{ и, соответственно,}$$

$$\langle v_{\text{отн}} \rangle = 4\pi \left( \frac{m_0}{4\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{m_0 v_{\text{отн}}^2}{4kT}} v_{\text{отн}}^2 dv_{\text{отн}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{2} \langle v \rangle$$

- Чем обуславливается существование максимума на кривой распределения Максвелла  $F(v)$  ?
- Какими особенностями распределения Максвелла  $F(v)$  обуславливается тот факт, что средняя арифметическая скорость  $\langle v \rangle$  молекул больше, чем наиболее вероятная, но меньше, чем средняя квадратичная?
- В закрытом сосуде объема  $V_0$  в отсутствие силовых полей находится  $N_0$  молекул идеального газа. Определите среднее число молекул  $\langle N \rangle$ , находящихся в ячейке объема  $V$ , являющейся малой частью объема  $V_0$ .
- Вычислите постоянную  $n_0$  распределения Больцмана газа, находящегося в теплоизолированном сосуде высоты  $H$ , который подвешен в вертикальном положении в однородном поле тяжести. Температура газа в сосуде везде одинакова и равна  $T$ .
- Утверждают следующее: поскольку молекулы воздуха в земной атмосфере движутся вверх с уменьшающимися скоростями, а движущиеся вниз увеличивают свои скорости под действием силы тяжести, тогда средние скорости молекул наверху, а с ними и температура воздуха должны быть меньше, чем внизу! Объясните, почему этот парадоксальный вывод противоречит термодинамике.
- Теплоизолированный сосуд с идеальным газом подвешен на нити в поле тяжести. Из-за действия силы тяжести плотность газа у дна сосуда больше, чем наверху. Нить пережигают, и сосуд свободно падает. Считая, что во время падения газ успевает прийти в состояние равновесия, определите, как изменится температура газа при падении (увеличится, уменьшится или останется прежней)
- Найти выражение для полного числа столкновений молекул газа в единичном объеме в единицу времени.

## VI. Вопросы к лабораторным работам

### Молекулярная физика и термодинамика

#### 2.1 Изучение температурной зависимости вязкости при помощи вискозиметра с падающим шариком

1. Явление вязкости. Причина возникновения вязкости в жидкости? Механизм вязкости в жидкости. Чем отличается механизм вязкости в жидкости от механизма вязкости в газах?
2. Вывод общего уравнения переноса. Закон Ньютона для жидкости (газа) (вывод). Физический смысл коэффициента вязкости.
3. Формула Френкеля (вывод). Как коэффициент вязкости зависит от температуры? Сравните полученный результат с температурной зависимостью вязкостью газа.

4. Закон Стокса (вывод). Как направлена сила Стокса? Границы применимости закона Стокса.
5. Энергия активации. Зависимость коэффициента вязкости от энергии активации. Что произойдет с вязкостью жидкости при уменьшении или при увеличении энергии активации?
6. Понятие потенциальной ямы и потенциального барьера для молекул жидкости. Условие преодоления молекулой потенциального барьера и выхода ее из потенциальной ямы.
7. Чем реальная жидкость отличается от идеальной жидкости? При движении в какой жидкости – реальной или идеальной – между слоями возникает сила внутреннего трения?
8. Перечислите основные отличительные свойства жидкости от газа и твердого тела. Чем тепловое движение молекул жидкости отличается от движения молекул газа и твердого тела?
9. Чему равна длина скачка молекулы жидкости? Что называют «временем оседлой жизни» молекулы жидкости? Изобразите траекторию движения молекулы газа, молекулы жидкости и молекулы твердого тела.

## **2.2. Экспериментальная проверка закона Бойля-Мариотта с применением установки Sovro3**

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории идеального газа. При каких условиях реальный газ можно считать идеальным?
2. Модель строения атома по Резерфорду. Чем молекула отличается от атома?
3. Выведите основное уравнение МКТ идеального газа. Сформулируйте физический смысл давления идеального газа и температуры.
4. На основе МКТ выведите уравнение состояния идеального газа или уравнение Менделеева-Клапейрона. Исходя из уравнения состояния, определите виды термодинамических систем: теплоизолированной, закрытой и открытой.
5. Из уравнения состояния идеального газа выведите законы изопроцессов. Изобразите графики изопроцессов и проведите их полный анализ.
6. Сформулируйте физический смысл следующих понятий МКТ: относительная атомная (молекулярная) масса вещества, количество вещества, моль вещества, молярная масса, универсальная газовая постоянная. Как связаны между собой плотность вещества, концентрация и масса молекулы? Единицы измерения указанных величин.
7. Вывод рабочей формулы.

## **2.3. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца с применением установки Sovro3**

1. Определите понятия: радиус молекулярного действия и сфера молекулярного действия. Ответ поясните соответствующим рисунком.
2. Что называют в термодинамике свободной поверхностью? Чем отличается состояние молекулы в поверхностном слое от состояния

молекулы в объеме жидкости? Опишите характер взаимодействия молекул в жидкости.

3. Опишите механизм возникновения поверхностного натяжения и сил поверхностного натяжения. К чему приложены силы поверхностного натяжения и как они направлены?
4. Как и почему силы поверхностного натяжения стремятся изменить площадь поверхностного слоя? Какую форму примет капля жидкости в отсутствии других сил (в невесомости) и почему?
5. Сформулируйте физический смысл коэффициента поверхностного натяжения. Дайте его энергетическую и силовую трактовку. Укажите единицы измерения коэффициента поверхностного натяжения.
6. Опишите температурную зависимость коэффициента поверхностного натяжения. При какой температуре его значение равно нулю?
7. Определите физический (термодинамический) смысл понятия свободной поверхностной энергии.
8. Определите с помощью рисунка понятие краевого угла. Каковы его значения в случае полного смачивания и полного несмачивания?
9. Опишите механизм возникновения явления смачивания и несмачивания. Может ли смачивание или несмачивание происходить для двух жидкостей?
10. Запишите условие равновесия капли жидкости, лежащей на твердой поверхности. Выведите формулы для краевых углов в случае смачивания и несмачивания жидкостью данного твердого тела.
11. Выведите формулу Лапласа для расчета дополнительного давления под искривленной поверхностью жидкости. Определите входящие в формулу физические величины. Капиллярные явления.
12. Как направлена сила поверхностного натяжения в момент отрыва кольца? Ответ поясните рисунком.
13. Объясните суть метода измерения коэффициента поверхностного натяжения, используемого в данной работе.
14. Можно ли определить коэффициент поверхностного натяжения методом отрыва кольца, если жидкость не смачивает кольцо? Ответ пояснить.
15. Вывод рабочей формулы для вычисления коэффициента поверхностного натяжения.

### **2.3. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца с применением установки Собр03**

1. Определите понятия радиуса молекулярного действия и сферы молекулярного действия. Ответ поясните соответствующим рисунком.
2. Что называется свободной поверхностью? Чем отличается состояние молекулы в поверхностном слое от состояния молекулы в объеме жидкости? Опишите характер взаимодействия молекул в жидкости.
3. Опишите механизм возникновения поверхностного натяжения и сил поверхностного натяжения. К чему приложены силы поверхностного натяжения и как они направлены?



4. Как и почему стремятся изменить площадь поверхностного слоя силы поверхностного натяжения? Какую форму примет капля жидкости в отсутствии других сил (в невесомости) и почему?
5. Сформулируйте физический смысл коэффициента поверхностного натяжения. Дайте его энергетическую и силовую трактовку. Укажите единицы измерения коэффициента поверхностного натяжения.
6. Опишите температурную зависимость коэффициента поверхностного натяжения. При какой температуре его значение равно нулю?
7. Определите физический (термодинамический) смысл понятия свободной поверхностной энергии.
8. Определите с помощью рисунка понятие краевого угла. Каковы его значения в случае полного смачивания и полного несмачивания?
9. Опишите механизм возникновения явления смачивания и несмачивания. Может ли смачивание или несмачивание происходить для двух жидкостей?
10. Запишите условие равновесия капли жидкости, лежащей на твердой поверхности. Выведите формулы для краевых углов в случае смачивания и несмачивания жидкостью данного твердого тела.
11. Выведите формулу Лапласа для расчета дополнительного давления под искривленной поверхностью жидкости. Определите входящие в формулу физические величины. Опишите капиллярные явления.
12. Как направлена сила поверхностного натяжения в момент отрыва кольца? Ответ поясните рисунком.
13. Объясните суть метода измерения коэффициента поверхностного натяжения, используемого в данной работе.
14. Можно ли определить коэффициент поверхностного натяжения методом отрыва кольца, если жидкость не смачивает кольцо? Ответ пояснить.
15. Вывод рабочей формулы для вычисления коэффициента поверхностного натяжения.

#### **2.4. Определение теплоемкости металлов**

1. Теплоемкость тела. Удельная теплоемкость и молярная теплоемкость, связь между ними.
2. Основные положения классической теории теплоемкости газов. Число степеней свободы и соответствующие им коэффициенты Пуассона. Границы применимости классической теории теплоемкости газов. Температурная зависимость теплоемкости водорода и ее объяснение.
3. Основные положения классической теории теплоемкости твердых тел. Вывод закона Дюлонга-Пти. Недостатки классической теории теплоемкости твердых тел.
4. Элементы первой квантовой теории теплоемкости твердых тел. Вывод формулы Эйнштейна и ее анализ. Какую область температурной зависимости теплоемкости твердых тел описывает формула Эйнштейна? Недостатки теории теплоемкости Эйнштейна.
5. Основные положения квантовой теории теплоемкости твердых тел Дебая. Вывод закона Дебая, анализ полученного результата.

6. Недостатки квантовой теории теплоемкости твердых тел Дебая. Путь усовершенствования квантовой теории теплоемкости твердых тел: фононы и фононный газ.
7. Определение характеристической температуры Дебая. Какую роль температура Дебая играет в температурной зависимости теплоемкости твердых тел?
8. Опишите суть метода определения удельной теплоемкости металлов в данной работе.
9. Вывод рабочей формулы для определения удельной теплоемкости металлов.

### **2.5. Распределение молекул газа по скоростям (распределение Максвелла)**

1. Классическая теория идеального газа и основные положения в ней о характере распределения молекул по скоростям Максвелла. При каких условиях распределение молекул газа по скоростям описывается распределением Максвелла? Почему распределение Максвелла называют равновесным распределением?
2. Запишите функции распределения молекул по проекциям скоростей и сформулируйте физический смысл данных функций.
3. Нарисуйте и проанализируйте график распределения молекул по одной из проекций скорости.
4. Выведите распределение молекул по скоростям. Постройте и проанализируйте график полученной функции:
  - Физический смысл площади, ограниченной кривой графика распределения молекул по скоростям и осью абсцисс;
  - Определение наивероятнейшей скорости теплового движения молекул (вывод);
  - Определение средней и средней квадратичной скорости теплового движения молекул (вывод);
  - Соотношение между характеристическими скоростями распределения Максвелла;
  - Влияние температуры термодинамической системы на вид распределения Максвелла (постройте график для двух различных температур);
  - Влияние массы молекул идеального газа на вид распределения Максвелла (постройте график для двух молекул различной массы).
5. Во сколько раз и как изменится средняя скорость движения молекул при переходе от кислорода к водороду?
6. В чем суть метода моделирования распределения молекул по скоростям в данной работе?
7. Почему во время эксперимента необходимо поддерживать постоянную плотность частиц в камере моделирования распределения молекул по скоростям?
8. Как в эксперименте рассчитывается скорость шарика, попадающего в один из приемных отсеков?

9. Гистограмма распределения вероятностей случайной величины и ее характеристики.
10. Опишите схему Отто Штерна по экспериментальной проверке закона Максвелла по распределению молекул по скоростям для молекулярных и атомных пучков и возможности проведения расчета в этом эксперименте.

## **2.6. Моделирование распределение концентрации молекул газа в гравитационном поле Земли (барометрическая высота)**

1. Вывод распределения давления газа в поле тяжести. Барометрическая формула и условия ее получения.
2. Отличие зависимости давления жидкости от высоты столба жидкости (при переходе от дна к верхним ее слоям) от зависимости давления атмосферы от высоты (при переходе от поверхности Земли к верхним ее слоям)? Причина данного отличия.
3. Почему механическая модель Р.Поля с шариками в данной лабораторной работе позволяет очень наглядно объяснять смысл «барометрической» формулы?
4. При каких условиях возможен переход от барометрической формулы к распределению концентрации молекул атмосферы по высоте? Приведите график зависимости концентрации молекул атмосферы по высоте.
5. Сформулируйте физический смысл показателя экспоненты в распределении концентрации молекул атмосферы по высоте и осуществите переход к закону (или теореме) Больцмана.
6. Закон или теорема Больцмана дает значительное обобщение для всех термически равновесных процессов. В чем физический смысл этого обобщения?
7. Ввиду исключительной важности закона Больцмана приведите еще один общий наглядный вывод этого уравнения.
8. Опишите опыт Ж.Перена и возможности вычисления числа Авогадро и постоянной Больцмана из этого опыта.
9. Вывод рабочей формулы.

## **2.12. Снятие кривой плавления и кристаллизации гипосульфита**

1. Дайте определение понятию вещества, формулируемое в молекулярно-кинетической теории вещества. Агрегатные состояния, виды агрегатных состояний, основной критерий различия агрегатных состояний. Основное свойство агрегатных состояний.
2. Твердые тела и формы его состояния. Общие макроскопические свойства кристаллов: ближний и дальний порядок. Фаза, фазовое состояние. Структура твердого тела и связь его физических свойств со структурой.
3. Условия установления ближнего и дальнего порядка. Термодинамический принцип минимума свободной энергии системы в установлении устойчивого состояния системы и определения ее конфигурации.
4. Фазовые переходы I и II рода. Опишите фазовые переходы I рода.
5. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса и его физический смысл. Фазовая диаграмма перехода «твердое тело-жидкость» и ее объяснение.

6. Плавление и кристаллизация. Возникновение переохлажденного состояния и причины существования такого состояния. Условия кристаллизации из переохлажденного состояния.

7. Нарисуйте диаграмму плавления и кристаллизации твердого тела и опишите все физические процессы, отображенные на этой диаграмме.

### **2.10. Определение коэффициента вязкости и средней длины свободного пробега молекул воздуха**

1. Число столкновений и средняя длина свободного пробега (вывод).

2. Эффективный диаметр молекул и эффективное сечение межмолекулярного взаимодействия. Как средняя длина свободного пробега связана с эффективным сечением молекулы?

3. Межмолекулярное взаимодействие и его природа. Покажите графически зависимость силы межмолекулярного взаимодействия от расстояния между двумя атомами.

4. Зависимость длины свободного пробега от давления и температуры. Формула Сезерленда. Покажите на потенциальной кривой зависимость длины свободного пробега от температуры для газов и жидкостей. Объясните различие зависимости  $\lambda(T)$  для газов и жидкостей.

5. Вывод общего уравнения переноса. Опишите механизм вязкости газов. Используя общее уравнение переноса, получите коэффициент вязкости для газов. Сформулируйте физический смысл коэффициента вязкости для газов.

6. Как коэффициент динамической вязкости связан с коэффициентом кинематической вязкости? Зависимость коэффициента вязкости от давления и от температуры. Единицы измерения коэффициента вязкости.

7. Какое движение жидкости (газа) называется ламинарным? Какими параметрами определяется число Рейнольдса и чему оно равно для ламинарного течения газа? Единицы измерения числа Рейнольдса.

8. Стационарное и нестационарное движение жидкости или газа. Вывод формулы Пуазейля для стационарного движения жидкости или газа.

9. Объясните принцип опытного определения коэффициента вязкости воздуха на основе капиллярного метода Пуазейля. Каким образом создается разность давлений на концах капилляра? Какими средствами измеряется величина потока воздуха через капилляр?

10. Вывод рабочей формулы.

### **2.15. Измерение энтропии при плавлении олова**

1. Обратимые и необратимые процессы. Второе начало термодинамики в формулировках Клаузиуса и Кельвина-Планка.

2. Определите понятие термодинамическая система. Какая термодинамическая система является изолированной, закрытой, открытой? Дайте определение равновесного состояния термодинамической системы.

3. Определите понятие приведенной теплоты. Теоремы Клаузиуса и энтропия. Свободная энергия или энергия Гельмгольца. Термодинамический смысл энтропии (вывод). Определите понятие связанная энергия.

4. Что означает: энтропия является функцией состояния? Перечислите известные вам функции состояния и определите их физический смысл.
5. Запишите обобщенное уравнение термодинамики (или  $TdS$  – уравнение), пояснив все входящие в него величины. Что происходит с энтропией в закрытой системе при обратимых и необратимых процессах?
6. Математическая формулировка второго начала термодинамики – неравенство Клаузиуса. Закон возрастания энтропии.
7. Статистический смысл энтропии. Формула Больцмана (вывод). Статистический вес и термодинамическая вероятность.
8. Что означает: энтропия является мерой рассеяния или обесценивания энергии? Единицы измерения энтропии.
9. Механизм процессов плавления и кристаллизации в твердых телах. Фазовый переход первого рода.
10. Удельная теплота плавления и кристаллизации. От каких физических характеристик зависит удельная теплота плавления и кристаллизации? Единицы измерения.
11. Объясните, как и почему изменяется энтропия при плавлении и кристаллизации твердых тел. Нарисуйте кривую плавления и кристаллизации твердого тела. Назовите условия кристаллизации твердых тел.
12. Вывод рабочей формулы.

### **2.17. Определение отношения теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме методом Клемана и Дезорма**

1. Теплоемкость тела. Удельная теплоемкость и молярная теплоемкость, связь между ними.
2. Термодинамическая система. Термодинамическая работа, теплота. Внутренняя энергия термодинамической системы. Внутренняя энергия идеального газа (вывод). Зависимость внутренней энергии идеального газа от числа степеней свободы и от температуры. Единицы измерения указанных величин.
3. Принцип механического эквивалента теплоты Джоуля и Роберта Майера. Первое начало термодинамики (вывод).
4. Применение первого начала термодинамики к изопротессам. Теплоемкость при постоянном объеме и ее зависимость от числа степеней свободы. Энтальпия. Теплоемкость при постоянном давлении и ее зависимость от числа степеней свободы.
5. Связь между теплоемкостями при постоянном давлении и объеме. Уравнение Роберта Майера (вывод).
6. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа. Число степеней свободы. Равномерное распределение кинетической энергии теплового движения молекул по степеням свободы (эргодическая гипотеза Больцмана).
7. Классическая теория теплоемкости газов.
8. Адиабатный процесс. Уравнение Пуассона для адиабатного процесса (вывод). Работа идеального газа в адиабатном процессе. Физический смысл коэффициента Пуассона. Связь коэффициента Пуассона с число степеней свободы.

## 9. Вывод рабочей формулы.

### 2.18. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса

1. С помощью модели объясните возникновение силы сопротивления при движении тел в жидкостях и газах. Выведите формулу Стокса. Как направлена сила Стокса? Укажите границы применимости закона Стокса.
2. Каков характер теплового движения молекул в жидкости? Каково соотношение между кинетической и потенциальной энергией для молекул жидкости?
3. Изобразите кривую зависимости потенциальной энергии двух взаимодействующих молекул от расстояния между ними. Покажите на потенциальной кривой область существования вещества в жидком состоянии.
4. Механизм возникновения вязкости в жидкостях. Запишите закон Ньютона для вязкости жидкости. Физический смысл коэффициента вязкости жидкости.
5. При каких условиях между слоями жидкости возникает сила вязкости? От каких параметров движения слоев жидкости зависит величина силы внутреннего трения?
6. Как коэффициент вязкости жидкости зависит от температуры? Запишите формулу Френкеля и поясните все величины, входящие в формулу Френкеля. Что называется энергией активации?
7. Запишите уравнение динамики шарика, движущегося равномерно в жидкости, используя рисунок. Определите все действующие на шарик силы. Сформулируйте закон Архимеда.
8. В вязкой жидкости с одной и той же высоты без начальной скорости начинают падать два шарика одинакового размера. Какой шарик упадет на дно быстрее, если шарики имеют разную массу? На какой из шариков будет действовать большая сила вязкого трения?
9. Вывод рабочей формулы.

### 2.19. Определение коэффициента теплопроводности твердых тел

1. Что такое теплота? Единицы измерения теплоты. Что такое теплообмен? Перечислите способы теплообмена. Поясните известные способы передачи теплоты.
2. Почему атомы в твердом теле можно представить в виде связанной системы? Какие колебания называются связанными? Поясните на примере двух связанных математических маятников, что такое нормальные колебания или мода колебаний.
3. Поясните механизмы теплопроводности в газах, жидкостях и твердых телах. Какими характеристиками вещества определяется коэффициент теплопроводности для каждого агрегатного состояния.
4. Какие агрегатные состояния вещества вы знаете? Какое соотношение между средними значениями кинетической и потенциальной энергии выполняется для каждого агрегатного состояния.

5. Фононный механизм теплопроводности в твердых телах. Что такое фонон? Чему равна энергия фонона? Чем фонон отличается от фотона?
6. В каких твердых телах присутствует решеточный механизм передачи тепла? В каких – электронный?
7. Выведите общее уравнение процесса переноса. Из уравнения процесса переноса выведите уравнение теплопроводности или закон Фурье. Что означает знак «минус» в законе Фурье?
8. Что понимается под изотермической поверхностью, температурным градиентом и тепловым потоком в законе Фурье?
9. Сформулируйте физический смысл коэффициента теплопроводности. Как коэффициент теплопроводности зависит от давления и от температуры? Установите связь между коэффициентами диффузии, вязкости и теплопроводности.
10. От каких параметров зависит коэффициент теплопроводности для твердого диэлектрика. Зависимость коэффициента теплопроводности от физических характеристик материалов.
11. Суть калориметрического метода и вывод рабочей формулы.

## Аннотация рабочей программы дисциплины

### «Молекулярная физика»

Рабочая программа учебной дисциплины «Молекулярная физика» разработана для студентов 1 курса очной формы обучения направления подготовки для студентов направления подготовки 03.03.02 «Физика», профиль «Фундаментальная и прикладная физика (совместно с НИУ ВШЭ, г. Москва)» в соответствии с требованиями федерального государственного стандарта высшего образования.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 8 зачетных единиц (288 часов). Учебным планом предусмотрены лекционные занятия (72 часа), лабораторные работы (72 часа), практические занятия (72 часа), самостоятельная работа студента (27 часов, в том числе на подготовку к экзамену 45 часов). Дисциплина «Молекулярная физика» входит в обязательную часть образовательной программы, реализуется на 1 курсе во 2-м семестре.

Молекулярная физика изучает макроскопические явления в веществах, т.е. такие явления, которые связаны с большим числом содержащихся в них молекул и атомов. Главное внимание уделяется изучению особенностей молекулярной формы движения и овладению статистическими методами описания систем многих частиц (статистические закономерности) и овладению термодинамическими методами на примере молекулярных систем.

Молекулярная физика исходит из представления об атомно-молекулярном строении вещества и рассматривает теплоту как беспорядочное движение атомов и молекул. Соответственно рассматриваются свойства и строение отдельных молекул и атомов. Статистический метод устанавливает связь макроскопических свойств изучаемых систем большого числа частиц со свойствами и законами их движения. При этом возможна как задача нахождения макроскопических свойств системы по известным свойствам составляющих ее частиц, так и обратная задача, нахождение свойств частиц, составляющих систему, по ее



макроскопическим свойствам. Поэтому молекулярно-кинетическая теория вещества может быть только статистической теорией, основной ее идеей является система большого числа частиц, которая измеряется параметрами и характеризуется закономерностями, имеющими статистический характер.

В случае равновесия макроскопической системы законы для средних величин, определяемые статистическим методом, совпадают с законами термодинамики. Таким образом, статистические закономерности являются теоретическим обоснованием термодинамических закономерностей.

Дисциплина «Молекулярная физика» логически и содержательно связана с другими изучаемыми дисциплинами: «Механика», «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», «Математический анализ».

Знания, полученные при изучении дисциплины «Молекулярная физика» будут использоваться при любой профессиональной деятельности: в научно-исследовательской студенческой курсовой и дипломной работе, в научной самостоятельной работе, в работе в качестве учителя школы и преподавателя высшего учебного заведения.

**Цель:** на основе представлений об атомно-молекулярном строении и об особой форме молекулярного движения объяснить физические свойства вещества в газообразном, жидком и твердом состояниях; описать и объяснить явления перехода из одного состояния в другое; описать и объяснить физические процессы, проходящие в веществе при внешних воздействиях.

**Задачи:**

- изучить атомно-молекулярное строение вещества в различных агрегатных состояниях;
- изучить молекулярную форму движения и ее закономерности;
- изучить тепловых свойств вещества от строения и молекулярной формы движения;
- изучить процессы, возникающие в веществах при внешних воздействиях – механических, химических и термических;

- изучить явления на границах раздела различных агрегатных состояний вещества;
- изучить процессы перехода из одного фазового состояния в другое;
- овладеть методами статистическим и термодинамическим с помощью математического аппарата: теории случайных величин и процессов, теории дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных.

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции:

Наименование категории (группы) универсальных компетенций	Код и наименование универсальной компетенции выпускника	Результаты обучения по дисциплинам (модулям), практикам
Системное и критическое мышление	УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Определяет роль и значение информации, информатизации общества, информационных технологий, использует теоретические основы информационных процессов преобразования информации

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания (результата обучения по дисциплине)
УК-1.1 Определяет роль и значение информации, информатизации общества, информационных технологий, использует теоретические основы информационных процессов преобразования информации	Знает: значение информации, информатизации общества, информационных технологий, основные понятия и определения теории информации
	Умеет: систематизировать информацию, применять методы преобразования информации, заложенные в современных программных средствах
	Владет: навыками создания, накопления и обработки информации

Наименование категории (группы) общепрофессиональных компетенций	Код и наименование общепрофессиональной компетенции (результат освоения)	Код и наименование индикатора достижения компетенции
Научное мышление	ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Использует в профессиональной деятельности основы физико-математических и (или) естественных наук

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания (результата обучения по дисциплине)
ОПК-1.1 Использует в профессиональной деятельности основы физико-математических и (или) естественных наук	Знает формулировку фундаментальных законов природы и основные физические и математические законы;
	Умеет применять физические и математические законы для описания наблюдаемых явлений.
	Владеет навыками применения фундаментальных законов физики и математики.