

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**  
**(Новосибирский государственный университет, НГУ)**

**Физический факультет**  
**Кафедра общей физики**

Согласовано, декан ФФ  
 Блиннов В.Е.  
 подпись  
  
 «07» 2026 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

Направление подготовки: **03.03.02 Физика**

Направленность (профиль):

**Физика. Фундаментальная и экспериментальная физика**

Направление подготовки **03.03.01 Прикладные математика и физика**

Направленность (профиль): **Все профили подготовки**

Форма обучения **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)					Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем				Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем/ Консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	216	48	64		16	64	18	4			2
Всего 216 часов/ 6 зачетных единиц, из них: - контактная работа 134 часа											
Компетенции : ОПК-1 (СУОС 03.03.02 Физика) ОПК-1 (ФГОС 03.03.01 Прикладные математика и физика)											

Ответственный за образовательную программу  
 д.ф.-м.н., проф.

  
 С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2026

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. ....	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий Структура и содержание дисциплины .....	4
5. Перечень учебной литературы.....	9
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....	9
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	9
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.....	9
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	10
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	10

## 1.Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Дисциплина «Молекулярная физика» имеет своей целью ознакомить студентов с основными методами и подходами, а также базовыми понятиями молекулярной физики и классической равновесной термодинамики, научить решать широкий круг задач в рамках этих дисциплин, подготовить понятийную базу для освоения дальнейших курсов теоретической физики, сформировать общекультурные и профессиональные навыки.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника общепрофессиональной компетенции: ОПК-5.

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ОПК-1. (ФГОС 03.03.01 Прикладные математика и физика).</b> Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности</p>	<p><b>ОПК-1.1.</b> Применяет теоретические и методологические основы физико-математических дисциплин, математический аппарат для решения профессиональных задач</p> <p><b>ОПК-1.2.</b> Использует терминологию и понятийный аппарат базовых физико-математических дисциплин в своей профессиональной деятельности.</p>	<p><b>Знать</b> основные молекулярные распределения и получаемые на их основе средние значения физических величин; природу теплоёмкости и молекулярные основы явлений переноса в плотных и разреженных газах; первое и второе начала термодинамики; понимать принципы термодинамики и физические основы работы</p>
<p><b>ОПК-1. (СУОС 03.03.02 Физика)</b> Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности</p>	<p><b>ОПК-1.1.</b> Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p><b>ОПК-1.2.</b> Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p><b>ОПК-1.3</b> Работает с учебной литературой в области физики и смежных с ней областях, необходимых в профессиональной деятельности.</p> <p><b>ОПК-1.4</b> Использует терминологию и понятийный аппарат базовых физико-математических дисциплин.</p>	<p>тепловых и охлаждающих машин; смысл термодинамических потенциалов и условия равновесия фаз.</p> <p><b>Уметь</b> рассчитывать равновесные и кинетические параметры молекулярных систем на основе молекулярных распределений;</p> <p><b>Анализировать</b> основные уравнения и технику расчета физических параметров (коэффициент полезного действия и холодильный коэффициент, теплоёмкости) различных термодинамических процессов для различных термодинамических систем.</p>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Молекулярная физика» является обязательной дисциплиной программы бакалавриата и реализуется во втором семестре кафедрой общей физики. Курс построен по принципу преемственности с дисциплиной «Механика и теория относительности», читаемой в первом семестре первого курса и является базовой для дальнейшего освоения других, идущих параллельно и следующих за ним дисциплин общей и теоретической физики: «Молекулярный практикум», «Аналитическая механика», «Статистическая физика», «Квантовая механика». Дисциплина «Молекулярная физика» представляет собой начальный курс молекулярной физики и классической равновесной термодинамики. Базовые знания основных молекулярных распределений, природы теплоёмкости и молекулярной основы явлений переноса в плотных и разреженных газах, законов термодинамики, а также умение рассчитывать равновесные и кинетические параметры молекулярных систем на основе молекулярных распределений используются при изучении специальных дисциплин на выпускающих кафедрах физического факультета.

## 3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Трудоемкость дисциплины составляет: 6 зачетных единиц, 216 часов.

Форма промежуточной аттестации: 2 семестр – экзамен

№	Вид деятельности	Семестр
		1
1	Лекции, ч	48
2	Практические занятия, ч	64
3	Лабораторные занятия, ч	
4	Прием заданий, ч	16
5	Занятия в контактной форме, ч из них	134
6	из них аудиторных занятий, ч	128
7	в электронной форме, ч	
8	консультаций, час.	4
9	промежуточная аттестация, ч	2
10	Самостоятельная работа, час.	82
11	Всего, ч	216

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

## 4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Молекулярная физика» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 1-м курсе физического факультета НГУ во 2 семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачётных единиц, 216 академических часов.

Лекции (48 ч)

Наименование темы и их содержание	Объем, час
<b>Идеальный газ.</b>	
Агрегатные состояния и характер движения в газах, жидкостях и твердых телах. Молекулярно-кинетическая теория, идеальный газ. Случайные величины, вероятности, средние значения, функции распределения. Температура и кинетическая энергия.	4
Распределение Максвелла по скоростям движения. Средняя, среднеквадратичная и наиболее вероятная скорости молекул. Молекулярные потоки и пучки. Давление идеального газа. Уравнение состояния.	2
Барометрическая формула. Распределение Больцмана. Связь распределения Больцмана с распределением Максвелла. Центрифугирование, разделение изотопов. Диэлектрическая поляризация. Опыты Перрена.	4
Связь распределения Максвелла с распределением Больцмана. Распределение Максвелла–Больцмана. Нахождение средней энергии. Степени свободы молекулы. Равнораспределение энергии по степеням свободы. Теплоемкость, вымораживание степеней свободы.	2
Столкновения молекул в газе, относительное движение. Частота соударений, длина свободного пробега, эффективное сечение. Распределение по длинам пробега, средняя длина свободного пробега. Столкновения и химические превращения. Константа скорости, закон действующих масс, химическая кинетика.	4
<b><i>Диффузия, теплопроводность, вязкость</i></b>	
Явления переноса. Принцип локального равновесия. Диффузия, закон Фика. Теплопроводность, закон Фурье. Вязкость, закон вязкости Ньютона. Коэффициенты диффузии, теплопроводности и вязкости в идеальном газе Процессы переноса в ультраразреженном газе. Эффузия, закон Грэма, эффект Кнудсена.	2
Вязкая жидкость: движение пластины, течение по трубе, движение шара, формула Стокса. Турбулентное течение. Подвижность частиц, связь между коэффициентами подвижности и диффузии). Броуновское движение. Уравнение Ланжевена. Формула Эйнштейна-Смолуховского. Одномерные блуждания: распределение по величинам перемещений. Уравнение диффузии. Диффузия в кристаллах.	4
<b><i>Законы термодинамики</i></b>	
Термодинамический подход к описанию молекулярных явлений. Термодинамическое равновесие. Уравнение состояния. Работа, внутренняя энергия, количество теплоты. Первое начало термодинамики. Обратимые и необратимые процессы. Теплоёмкость. Расширение и сжатие идеальных газов, политропический процесс. Скорость звука в идеальном газе.	2
Циклические процессы. Преобразование теплоты в работу, КПД циклов. Цикл Карно. Тепловые насосы, холодильная машина. Цикл Отто. Обратный цикл: холодильная машина, тепловой насос.	2
Второе начало термодинамики. Эквивалентность различных формулировок второго начала термодинамики. Теорема Карно. Теорема о приведённых теплотах. Неравенство Клаузиуса. Термодинамическая шкала температур. Закон возрастания энтропии.	4

Энтропия идеального газа. Процесс Гей-Люссака, смешение газов, парадокс Гиббса. Изменение энтропии в неравновесных процессах. Физический (статистический) смысл энтропии, формула Больцмана. Флуктуации. Термодинамические потенциалы и условия термодинамической устойчивости. Соотношения Максвелла. Зависимость внутренней энергии от объема. Термодинамическая температура из теплового расширения. Метод циклов.	4
<b><i>Фазовые и химические превращения</i></b>	
Реальные газы. Межмолекулярное взаимодействие. Газ Ван-дер-Ваальса. Правило Максвелла. Критическая точка, закон соответственных состояний. Охлаждение газов. Процессы Гей-Люссака и Джоуля-Томсона. Сжижение газов.	2
Фазовые переходы первого и второго рода. Химический потенциал. Условие фазового равновесия. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Испарение и кипение, возгонка (сублимация) и осаждение (десублимация). Равновесие трех фаз. Метастабильные состояния, камера Вильсона и пузырьковая камера. Химическое равновесие в идеальном газе.	4
<b><i>Растворы, гетерогенные системы, поверхности</i></b>	
Поверхностное натяжение жидкости. Краевой угол. Капиллярные силы. Формула Лапласа. Давление пара над искривленной поверхностью, капиллярная конденсация.	4
Растворы, идеальные растворы. Закон Рауля (12). Закон Генри. Осмос и осмотическое давление (15). Значение осмоса для живых организмов. Кипение и замерзание растворов. Химический потенциал раствора. Термодинамика кипения и замерзания растворов.	3
Гетерогенные системы. Адсорбция на твердые поверхности. Коллоидные растворы и взвеси. Гидрофобный эффект и самоорганизация амфифильных молекул в водном окружении.	1

#### Контрольные работы (4 ч)

Наименование темы и их содержание	Объем, час
Идеальный газ. Диффузия, теплопроводность, вязкость	2
Законы термодинамики. Фазовые и химические превращения. Растворы, гетерогенные системы, поверхности.	2

#### Практические занятия (64 ч)

Содержание практического занятия	Объем, час
<b>Идеальный газ.</b>	20
<i>Занятие 1.</i> Распределение Максвелла по скоростям. Системы координат: декартовая, цилиндрическая, сферическая. Графики функций распределения молекул по компоненте скорости $v_x$ и по абсолютной величине скорости. Распределение молекул по энергиям. Задачи: № 2.6, 2.8.	
<i>Занятие 2.</i> Средние значения скорости и энергии молекул. Флуктуации параметров. Доля молекул, скорости которых больше заданной. Задачи: № 2.7, 2.9, 2.10, 2.12.	

<p><i>Занятие 3.</i> Давление идеального газа. Распределение молекул по скоростям в потоке. Средняя скорость и энергия частиц в потоке. Задачи: № 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21, 2.30, 4.28.</p> <p><i>Занятие 4.</i> Силовое воздействие молекулярного потока. Задачи: № 2.28, 2.32, 4.27.</p> <p><i>Занятие 5.</i> Распределения в потоке для различных физических систем. Задачи: № 2.24, 2.25, 2.27, 2.29, 2.31, 2.33, 4.26.</p> <p><i>Занятие 6.</i> Применение статистических методов для анализа физических систем. Задачи: № 2.13, 4.23, 4.24, 4.25, 2.14, 2.34.</p> <p><i>Занятие 7.</i> Распределение Больцмана для различных физических систем в поле тяжести. Задачи: Найти распределение газа в “толстой” изотермической атмосфере планеты (толщина атмосферы сравнима с радиусом планеты). Исследовать предельный случай тонкой атмосферы. № 2.37, 2.36, 2.38, 4.30, 2.39, 2.40, 2.43, 4.31, 2.48, 4.32.</p> <p><i>Занятие 8.</i> Распределение частиц по радиусу в центрифуге. Распределение Максвелла-Больцмана. Формула для средней энергии. Полная средняя энергия частиц. Задачи: № 2.44, 4.33, 2.41, 2.49.</p> <p><i>Занятие 9.</i> Теплоемкость одноатомного и многоатомного газов в классическом приближении. Расчет теплоемкости для системы с произвольным сплошным энергетическим спектром. Задачи: № 2.53, 2.54, 4.34, 2.55, 2.56, 2.60, 2.61</p> <p><i>Занятие 10.</i> Теплоемкости квантовых систем (низкие температуры). Определение температур вымораживания колебательных и вращательных степеней свободы для двухатомных молекул. Задачи: № 2.63, 2.64, 2.66, 2.67, 2.70, 2.71</p> <p><i>Занятие 11.</i> Одноатомный газ. Распределение по относительным скоростям. Столкновение молекул. Длина свободного пробега. Задачи: № 3.2-3.4.</p> <p><i>Занятие 12.</i> Столкновение молекул. Смесь газов. Распределение по длинам свободного пробега. Задачи: № 4.35, 4.36, 3.5, 3.7, 4.37.</p>	
<p><b><i>Диффузия, теплопроводность, вязкость.</i></b></p>	20
<p><i>Занятие 13.</i> Явления переноса в плотном газе: диффузия, теплопроводность, вязкость. Оценочные значения коэффициентов переноса. Диффузия. Задачи: № 3.8, 3.12, 3.9.</p> <p><i>Занятие 14.</i> Стационарный теплообмен и ламинарное течение. Задачи: № 3.13, 3.15, 3.16, 3.18, 3.21, 3.22.</p> <p><i>Занятие 15.</i> Явления переноса в ультраразреженных газах. Нестационарные процессы. Задачи: № 3.24, 3.25, 3.26, 3.28, 3.29.</p> <p><i>Занятие 16.</i> Явления переноса в ультраразреженных газах. Стационарные процессы. Задачи: №3.34—3.36, 3.38.</p> <p><i>Занятие 17.</i> Броуновское движение и подвижность. Задачи: № 3.42 — 3.45.</p>	

<b>Законы термодинамики</b>	16
<p><i>Занятие 19.</i> Работа и количество теплоты. Внутренняя энергия системы. Первое начало термодинамики. Равновесные процессы. Теплоемкость.  Задачи: Для одного моля идеального газа рассмотреть следующие равновесные процессы: изохорический, изобарический, изотермический, адиабатический и политропический. Получить уравнение каждого процесса в переменных <math>p, V</math>. Вычислить: работу <math>A</math>, совершенную газом; количество теплоты <math>Q</math>, полученное им; изменение внутренней энергии <math>\Delta U</math>; теплоемкость <math>C</math>. Получить соотношение Майера. Считать молярные теплоемкости <math>C_p</math> и <math>C_V</math> известными и постоянными.  № 1.8, 1.12, 1.14.</p> <p><i>Занятие 20.</i> Работа и количество теплоты. Внутренняя энергия системы. Первое начало термодинамики. Теплоемкость. Неравновесные процессы.  Задачи: № 1.22, 4.4, 1.17, 1.20.</p> <p><i>Занятие 21.</i> Циклические процессы. Цикл Карно.  Задачи: № 1.23, 1.24, 1.25, 4.6, 4.8.</p> <p><i>Занятие 22.</i> Цикл Карно. Неравенство Клаузиуса. Получение максимальной работы.  Задачи: № 1.27, 1.28, 1.29, 1.30, 1.31.</p> <p><i>Занятие 23.</i> Неравенство Клаузиуса. Метод циклов.  Задачи: № 1.35, 1.39, 1.40, 1.41, 1.42.</p> <p><i>Занятие 24.</i> Энтропия — функция состояния.  Задачи: Для одного моля идеального газа рассмотреть следующие равновесные процессы: изохорический, изобарический, изотермический, адиабатический и политропический. Вычислить изменение энтропии <math>\Delta S</math>.  № 1.43, 1.44.</p> <p><i>Занятие 25.</i> Энтропия системы. Второе начало термодинамики. Изменение энтропии в неравновесных процессах без подвода тепла  Задачи: № 1.45, 1.46, 1.47.</p> <p><i>Занятие 26.</i> Энтропия системы. Второе начало термодинамики. Вычисление изменения энтропии в сложных процессах.  Задачи: № 1.48, 1.51, 1.52.</p>	
<b>Фазовые и химические превращения, растворы, гетерогенные системы, поверхности</b>	8
<p><i>Занятие 27.</i> Определение критических параметров для газа Ван-дер-Ваальса. Термодинамические свойства газа Ван-дер-Ваальса.  Задачи №1.1, 1.2, 1.77, 1.79.</p> <p><i>Занятие 28.</i> Химический потенциал.  Задачи: № 1.99 – 1.101.</p> <p><i>Занятие 29.</i> Процесс Джоуля-Томсона. Равновесие фаз.  Задачи: № 1.62, 1.103, 1.106, 1.108, 1.109, 1.110.</p> <p><i>Занятие 30.</i> Поверхностное натяжение. Давление под искривленной поверхностью.  Задачи: № 1.113 – 1.117.</p> <p><i>Занятие 31.</i> Термодинамика поверхности. Метод циклов. Давление насыщенного пара над искривленной поверхностью.  Задачи: № 1.118, 1.121, 1.122, 1.123.</p>	

## Самостоятельная работа студентов (82 часа)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям, решение задач	54
Подготовка к контрольным работам	7
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	3
Подготовка к экзамену	18

### 5. Перечень учебной литературы

1. Дзюба С. А., Замураев В. П., Калинина А. П. Молекулярная физика, часть 1, Молекулярно-кинетическая теория, Новосибирск: Изд. НГУ, 2012. (87 экз.)
2. Дзюба С. А., Замураев В. П., Калинина А. П. Молекулярная физика, часть 2, Термодинамика, Новосибирск: Изд. НГУ, 2012. (83 экз.)
3. Замураев В. П., Калинина А. П. Задачи с решениями по молекулярной физике, часть 1, Элементы статистической физики. Новосибирск: Изд. НГУ, 2013. (83 экз.)
4. Замураев В. П., Калинина А. П. Задачи с решениями по молекулярной физике, часть 2, Элементы физической кинетики. Новосибирск: Изд. НГУ, 2014. (85 экз.)
5. Замураев В. П., Калинина А. П. Задачи с решениями по молекулярной физике, часть 3, Первое и второе начало термодинамики. Новосибирск: Изд. НГУ, 2014. (88 экз.)
6. Замураев В. П., Калинина А. П. Задачи с решениями по молекулярной физике, часть 4, Термодинамические потенциалы. Термодинамика разных систем. Фазовые переходы. Новосибирск: Изд. НГУ, 2013. (83 экз.)
7. Румер Ю. Б., Рывкин М. Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика, Изд. 3-е, стер.- Новосибирск: Сиб.унив. изд-во: Новосиб. ун-та, 2001.-608с. (676 экз.)

### 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Материал лекций изложен в свободном доступе на сайте

<http://hf.nsu.ru/freshmen.html>

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

#### 7.1 Ресурсы сети Интернет

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

#### 7.2 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

### 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

#### 8.1 Перечень программного обеспечения

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **8.2 Информационные справочные системы**

Не используются.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины «Молекулярная физика» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### ***Текущий контроль успеваемости***

Текущий контроль успеваемости осуществляется на практических занятиях преподавателем при решении типовых задач студентом, обсуждаются идеи и способы решения задач, рекомендованных для практических занятий. В течение семестра проводится контрольные работы и прием обязательных заданий по дисциплине. Одновременно с этим проводятся индивидуальные консультации обучающихся. Результаты текущего контроля служат основанием для выставления оценок в ведомость контрольной недели на факультете.

#### ***Промежуточная аттестация.***

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Необходимым условием получения положительной оценки на экзамене является решение и сдача всех задач из заданий, выполняемых в течение семестра.

Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции. Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации. Критерии оценивания результатов обучения представлены в Таблице 10.2.

**Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины**

Таблица 10.1

Код компетенции	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине	Оценочное средство
<p><b>ОПК-1.</b> <b>(ФГОС 03.03.01</b> <b>Прикладные математика и физика).</b></p>	<p><b>ОПК-1.1.</b> Применяет теоретические и методологические основы физико-математических дисциплин, математический аппарат для решения профессиональных задач</p> <p><b>ОПК-1.2.</b> Использует терминологию и понятийный аппарат базовых физико-математических дисциплин в своей профессиональной деятельности.</p>	<p><b>Знать</b> основные молекулярные распределения и получаемые на их основе средние значения физических величин; природу теплоёмкости и молекулярные основы явлений переноса в плотных и разреженных газах; первое и второе начала термодинамики; понимать принципы термодинамики и физические основы работы тепловых и охлаждающих машин; смысл</p>	<p>Решение задач Контрольная работа Экзамен</p>
<p><b>ОПК-1.</b> <b>(СУОС 03.03.02</b> <b>Физика)</b></p>	<p><b>ОПК-1.1.</b> Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p><b>ОПК-1.2.</b> Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p><b>ОПК-1.3</b> Работает с учебной литературой в области физики и смежных с ней областях, необходимых в профессиональной деятельности.</p>	<p>термодинамических потенциалов и условия равновесия фаз.</p> <p><b>Уметь</b> рассчитывать равновесные и кинетические параметры молекулярных систем на основе молекулярных распределений; <b>Анализировать</b> основные уравнения и технику расчета физических параметров (коэффициент полезного действия и холодильный коэффициент, теплоёмкости) различных термодинамических процессов для различных термодинамических систем.</p>	

Код компетенции	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине	Оценочное средство
	ОПК-1.4 Использует терминологию и понятийный аппарат базовых физико-математических дисциплин.		

## 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Молекулярная физика».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<p><u>Контрольные работы в течение семестра:</u> не менее 90% задач имеют правильное решение</p> <p><u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 23 задач в течение семестра</p> <p><u>Экзамен:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- дан развернутый ответ на вопросы билета, задача решена без ошибок,</li> <li>– точность и корректность применения терминов и понятий;</li> <li>- умение делать выводы и обобщения,</li> <li>– наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.</li> </ul> <p>В ответах на вопросы обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.</p>	<i>Отлично</i>
<p><u>Контрольные работы в течение семестра:</u> не менее 80% задач имеют правильное решение</p> <p><u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 80 задач в течение семестра</p> <p><u>Экзамен:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- дан правильный ответ на вопросы билета, задача решена (допускается несколько несущественных ошибок),</li> <li>– наличие правильных ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.</li> </ul> <p>В ответах на вопросы обучающийся мог допустить незначительные ошибки.</p>	<i>Хорошо</i>
<p><u>Контрольные работы в течение семестра:</u> не менее 70% задач имеют правильное решение</p> <p><u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 70% задач в течение семестра</p> <p><u>Экзамен:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- дан правильный ответ на вопрос билета, задача решена (допускается несколько несущественных ошибок),</li> <li>– наличие правильных ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.</li> </ul>	<i>Удовлетворительно</i>

<p><u>Контрольные работы в течение семестра:</u> менее 60% задач имеют правильное решение</p> <p><u>Сдача заданий:</u> сдано менее 60% задач в течение семестра</p> <p><u>Экзамен:</u> - на вопросы билета не отвечает, задача не решена, – не отвечает на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.</p>	<p><i>Неудовлетворительно</i></p>
---	-----------------------------------

### Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Обязательные семестровые задания

##### Задание 1 (сдача до 31-го марта)

1. В сосуде находится идеальный газ. Масса молекул равна  $m$ , температура газа  $T$ . С каким абсолютным значением скорости молекулы наиболее часто ударяются о стенку? Объяснить разницу с наиболее вероятной скоростью  $v_m$  молекул в газе.

2. Найти число молекул, ударяющихся о единицу площади поверхности сосуда в единицу времени и имеющих абсолютное значение скорости большее, чем некоторая заданная величина  $v_0$ .

3. Идеальный двумерный газ находится в неравновесном состоянии, в котором все молекулы имеют одинаковые по модулю скорости  $v$  и изотропно распределены по направлениям движения в плоскости, в которой газ находится. Найти распределение для проекций скоростей на некоторую ось в плоскости. Рассчитать давление газа и число ударов молекул о единичный отрезок ограничивающей газ границы. Двумерная концентрация газа  $n$ , масса молекулы  $m$ .

4. Из сосуда объемом  $V$  газ истекает в вакуум через малые отверстия общей площадью  $S$ . Как во времени нужно подводить тепло к газу, чтобы его температура оставалась неизменной? Как будет изменяться температура газа в адиабатически изолированном сосуде? Начальная плотность газа  $n_0$ .

5. Два полых цилиндра с поперечными сечениями  $S$  и  $2S$  и одинаковой высоты  $h$  соединены встык и образуют замкнутый сосуд. В его объем закачан идеальный газ при температуре  $T$ . Найти относительное изменение давления в нижней части сосуда при его переворачивании, возникающее при учете неравномерности распределения газа по высоте. Оценить его для условий Земли.

6. В центрифуге радиусом  $R$ , вращающейся с угловой скоростью  $\omega$ , находится смесь двух газов с молекулярными весами  $\mu_1$  и  $\mu_2$  и количеством молекул  $N_1$  и  $N_2$ . Найти отношение плотностей газов у внешней стенки и на оси центрифуги. Сделать оценки для смесей  $H_2$  —  $D_2$  и  $U^{235}$  —  $U^{238}$ ;  $R = 10$  см,  $\omega = 10^4$  с<sup>-1</sup>.

7. В боковой стенке сосуда с идеальным газом (концентрация  $n$ , температура  $T$ , масса молекулы  $m$ ) имеется отверстие, закрытое заслонкой. В момент времени  $t = 0$  заслонку открывают на короткое время  $\tau$ . Найти в момент времени  $t \gg \tau$  функцию распределения вылетевших частиц по расстоянию  $x$  от стенки и среднее значение этого расстояния.

8. Молекулы реального газа взаимодействуют друг с другом по закону  $u = -a/r^6$  при  $r > d$ , где  $d$  – эффективный диаметр молекулы. Найти зависимость сечения соударений  $\sigma$  от температуры (поправка Сезерленда), считая соударением соприкосновение частиц.

9. Оценить время испарения воды из трубки длиной 10 см, запаянной с одного конца. Температура комнатная. Первоначально вода заполняла трубку наполовину.

Относительная влажность воздуха 50 %, давление насыщенных паров 27 мм рт. ст. Длина свободного пробега молекул в системе воздух–пар порядка  $10^{-5}$  см. Пар у поверхности воды считать насыщенным, капиллярными явлениями пренебречь.

10. Определить, на какой угол  $\varphi$  повернется диск, подвешенный на упругой нити, если под ним на расстоянии  $h = 1$  см вращается второй такой же диск с угловой скоростью  $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$ . Радиус дисков  $R = 10$  см, модуль кручения нити  $f = 100$  дин·см/рад. Между дисками находится аргон (газокинетический диаметр атома 3,6 Å). Построить график зависимости угла поворота  $\varphi$  от давления  $P$ .

11. Для измерения теплопроводности газа им заполняется пространство между двумя длинными коаксиальными цилиндрами радиусами  $r_1$  и  $r_2$ . Заполнение производится при невысоком давлении ( $\sim 10$  мм рт. ст.), чтобы исключить конвекцию. Внутренний цилиндр нагревается источником тепла с удельной мощностью  $Q$ , установившиеся температуры цилиндров  $t_1$  и  $t_2$  измеряются. Рассчитать коэффициент теплопроводности и газокинетический диаметр молекулы для азота, если  $r_1 = 0,5$  см,  $r_2 = 2$  см,  $Q = 0,038$  Вт/см,  $t_1 = 93$  °C  $t_2 = 0$  °C

12. В сферическом реакторе радиусом  $R$ , заполненном газообразной смесью реагентов, идет химическая реакция. Тепловой эффект реакции в расчете на единичный объем равен  $Q$ . Какой поток тепла следует снимать с поверхности реактора, если ее температура поддерживается равной  $T_0$ ? Найти распределение температуры в реакторе. Учесть зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

## Задание 2 (сдача до 25-го мая)

1. Из сосуда, в котором находится газ при комнатной температуре и под давлением  $p_1$ , большим атмосферного  $p_0$ , приоткрыв кран, выпускают газ, пока избыток давления не исчезнет. Затем кран закрывают и, после того как температура в сосуде вновь станет комнатной, измеряют давление в сосуде  $P_2$ . Как по этим данным найти показатель адиабаты газа  $\gamma$ ? Истечение считать квазистационарным.

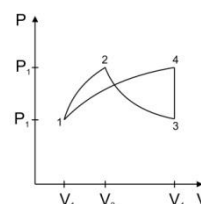
2. Идеальный газ сжимается под поршнем в цилиндре так, что уходящее в окружающую среду тепло равно изменению внутренней энергии газа. Определить работу, затраченную на сжатие моля газа при изменении объема в два раза. Чему равна теплоемкость в этом процессе? Начальная температура газа  $T_0$ .

3. Доказать, что зависимость давления от объема для адиабаты круче, чем для изотермы.

4. Один моль  $\text{H}_2\text{O}$  с температурой 25 °C охлаждается до 0 °C и замерзает. Все тепло, полученное охлаждающей машиной, работающей с максимальной теоретически допустимой эффективностью, передается другому молю  $\text{H}_2\text{O}$  при 25 °C в результате чего его температура повышается до 100 °C сколько молей  $\text{H}_2\text{O}$  переходит в пар при 100 °C Теплота испарения при 100 °C равна 9730 кал/моль. Теплота плавления льда при 0 °C равна 1438 кал/моль.

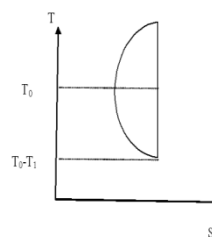
5. Предложенный Томсоном принцип динамического отопления состоит в следующем. Работающий на угле тепловой двигатель с водяным охлаждением приводит в действие холодильную машину. Холодильная машина отнимает теплоту от окружающей среды (грунтовые воды, например) и отдает ее воде в отопительной системе помещения. Одновременно вода в отопительной системе служит холодильником теплового двигателя. Определить теоретическое количество тепла, которое получает отапливаемое помещение от сжигания 1 кг угля. Удельная теплота сгорания угля  $q = 8000$  ккал/кг, температура в котле двигателя  $t_1 = 210$  °C, температура воды в отопительной системе  $t_2 = 60$  °C, грунтовой воды  $t_3 = 15$  °C.

6. Найти полную работу цикла, состоящего из политропы 1-2 ( $C_1 = \text{const}$ ), изотермы 2-3, изохоры 3-4 и политропы 4-1 ( $C_2 = \text{const}$ ), если



известны  $p_1, V_1$ , а  $p_2=p_4=2p_1, p_3=p_1, V_2=2V_1, V_3=V_4=4V_1$ .  $C_1$  и  $C_2$  различны, рабочее тело – двухатомный идеальный газ.

Рассчитать КПД тепловой машины с произвольным веществом в качестве рабочего тела, совершающий обратимый цикл, представленный на TS-диаграмме (половина эллипса).



7. Теплоизолированный цилиндрический сосуд разделен поршнем пренебрежимо малой массы на две равные части. По одну сторону поршня находится идеальный газ с массой  $M$ , молекулярным весом  $\mu$  и молярными теплоемкостями  $C_V$  и  $C_P$ , не зависящими от температуры, а по другую сторону поршня создан высокий вакуум. Начальная температура и давление газа  $T_0$  и  $P_0$ . Поршень отпускают, и он, свободно двигаясь, дает возможность газу заполнить весь объем цилиндра. После этого, постепенно увеличивая давление на поршень, медленно доводят объем газа до первоначальной величины. Найти изменение внутренней энергии и энтропии газа при таком процессе.

8. Выразить изменение температуры свободно расширяющегося одноатомного газа через начальный и конечный объемы и константы уравнения Ван-дер-Ваальса для газа.

9. Для газа Ван-дер-Ваальса:

- (1) доказать, что теплоемкость  $C_V$  зависит только от температуры;
- (2) найти выражение для внутренней энергии и энтропии;
- (3) найти уравнение адиабаты в переменных  $p$  и  $V$ .

10. Определить точку кипения воды на вершине холма высотой 300 м над уровнем моря. Изменением температуры с высотой пренебречь. Удельная теплота парообразования при нормальных условиях равна 540 ккал/г, пар подчиняется уравнению состояния идеального газа.

11. Для некоторого газа давление  $p$ , объем  $V$  и внутренняя энергия  $U$  связаны соотношением  $pV = gU$ , где  $g$  – константа. Найти уравнение адиабаты в переменных  $p$  и  $V$ .

## 2. Примерный вариант контрольной работы

Контрольная работа состоит из 3 теоретических вопросов и задачи. Везде предполагается подробный вывод формул. Ссылка на черновик не допускается. При отсутствии промежуточных выкладок и описания хода рассуждений ответ не засчитывается.

### Варианты контрольной работы 1:

№1

1. Давление идеального газа
2. Частота соударений, средняя длина свободного пробега, эффективное сечение
3. Процессы переноса в ультраразреженном газе
4. Задача. Идеальный газ находится в поле тяжести в закрытом цилиндрическом сосуде высоты  $h$ . Во сколько раз изменится давление газа на дно сосуда, если его температуру увеличить в два раза.  $T_0$  – первоначальная температура газа,  $m$  – масса молекулы.

№2

1. Средняя, среднеквадратичная и наиболее вероятная скорости молекул
2. Предельные случаи в формуле Ланжевена для высокой и низкой температур
3. Подвижность, связь между коэффициентами подвижности и диффузии
4. Задача. Идеальный газ находится в поле тяжести в закрытом цилиндрическом сосуде высоты  $h$ . Во сколько раз изменится давление газа на дно сосуда, если его

температуру увеличить в два раза.  $T_0$  – первоначальная температура газа,  $m$  – масса молекулы.

### Варианты к контрольной 2:

#### №1

1. Вывод формулы для энтропии идеального газа как функции давления и температуры.
2. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса: вывод методом циклов.
3. (а) Определить изменение молярного потенциала Гиббса идеального газа, когда его давление увеличивается от  $p_1$  до  $p_2$  в изотермическом процессе при температуре  $T$ . (б) Когда объем идеального газа  $V_1$ , находящийся при давлении  $p$  и температуре  $T$ , подвергли изотермическому сжатию при этой же температуре, его энтропия уменьшилась на величину  $\Delta S$ . Найти изменение потенциала Гиббса.
4. Температура одного моля идеального газа повышается от  $T_1$  до  $T_2$  в (1) изохорическом и (2) адиабатическом процессах. Для каждого процесса найти совершенную газом работу, количество подведенной к нему теплоты и изменение внутренней энергии газа.

#### №2

1. Теплоёмкость: изотермическое, изобарическое и адиабатическое расширение и сжатие идеальных газов.
2. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса: вывод с использованием химического потенциала.
3. (а) Найти изменение термодинамического потенциала Гиббса миллимоля азота при изотермическом расширении при температуре  $T$  от объема  $V_1$  до объема  $V_2$ . (б) Когда объем идеального газа  $V_1$ , находящийся при давлении  $p$  и температуре  $T$ , подвергли изотермическому сжатию при этой же температуре, его энтропия уменьшилась на величину  $\Delta S$ . Найти изменение потенциала Гиббса.
4. Для идеального газа найти в переменных  $p, V$  уравнение квазистатического процесса, при котором уходящее в окружающую среду тепло равно изменению внутренней энергии газа.

### **Пример экзаменационного билета**

1. Идеальный газ, давление идеального газа.
2. Химический потенциал. Условие равновесия фаз химически однородного вещества.
3. Рассчитать, во сколько раз отличается длина свободного пробега молекулы  $H_2$  от длины свободного пробега молекулы  $N_2$  в газовой смеси, в которой азот является малой примесью. Различием в размерах молекул пренебречь.

### **Экзаменационные вопросы по молекулярной физике**

1. Вывод распределения Максвелла.
2. Вывод распределения по скоростям молекул в потоке, расчет полной величины молекулярного потока.
3. Вывод формулы для давления идеального газа.
4. Вывод барометрической формулы.
5. Распределение Больцмана как обобщение барометрической формулы.
6. Распределение Максвелла-Больцмана, нахождение средней энергии с помощью статсуммы.
7. Вывод распределения по скоростям относительного движения молекул в газе, средняя скорость относительного движения.

8. Вывод формулы для частоты соударений и средней длины свободного пробега.
9. Подвижность молекул, связь между коэффициентом подвижности и коэффициентом диффузии (формула Эйнштейна).
10. Диффузия, закон Фика.
11. Теплопроводность, закон Фурье.
12. Вязкость, закон вязкости Ньютона.
13. Теплоёмкость. Изотермическое, изобарическое и адиабатическое расширение и сжатие идеальных газов, политропический процесс.
14. Цикл Карно.
15. Второе начало термодинамики для обратимых процессов. Формулировки Томсона и Клаузиуса, доказательство их эквивалентности.
16. Теорема Карно.
17. Теорема о приведённых теплотах.
18. Энтропия – функция состояния. Закон возрастания энтропии.
19. Изменение энтропии идеального газа при изотермическом расширении.
20. Изменение энтропии при контакте тел с разными температурами, расширении в пустоту, смешении газов. Парадокс Гиббса.
21. Термодинамические потенциалы. Естественные переменные. Соотношения Максвелла.
22. Условия термодинамической устойчивости.
23. Газ Ван-дер-Ваальса. Изотермы газа Ван-дер-Ваальса. Правило Максвелла.
24. Холодильная машина, тепловой насос.
25. Химический потенциал, условие фазового и химического равновесия.
26. Химический потенциал идеального газа.
27. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Равновесие между паром и конденсированной фазой.
28. Поверхностное натяжение жидкостей. Краевой угол.
29. Капиллярные силы.
30. Осмос и осмотическое давление, формула Вант-Гоффа.
31. Электростатическая поляризация газов.
32. Закон равнораспределения энергии по степеням свободы, вывод методом статсумм.
33. Распределение по длинам и временам пробега молекул в газе.
34. Константа скорости химической реакции, энергия активации, закон действующих масс.
35. Расчет коэффициента диффузии в идеальном газе.
36. Процессы переноса в ультраразреженном газе. Эффузия, эффект Кнудсена
37. Броуновское движение, уравнение Ланжевена, формула Эйнштейна–Смолуховского.
38. Одномерные блуждания: распределение по величинам перемещений.
39. Статистический смысл энтропии: изменение энтропии при отклонении от равновесия, формула (принцип) Больцмана.
40. Метод циклов, вывод формулы  $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V - p$ .
41. Формула Лапласа для поверхностного натяжения.
42. Давление пара над искривленной поверхностью, капиллярная конденсация.

43. Законы Генри и Рауля.
44. Химический потенциал идеального раствора.
45. Кипение и замерзание растворов (вывод одним из возможных способов).

#### Примеры экзаменационных задач

1. Рассчитать силу, с которой вытекающий из малого отверстия в вакуум молекулярный пучок давит на пластинку радиуса  $r$ , расположенную на расстоянии  $l$  от отверстия и центрированную с ним. Площадь отверстия  $S$ .

2. Во вращающейся центрифуге находится смесь изотопов водорода  $D_2$  и  $H_2$  в пропорции  $N_{D_2}/N_{H_2} = \beta$ . Во сколько раз можно увеличить соотношение компонент в смеси, если ее отбор производить с боковой поверхности центрифуги?

3. На поверхности площадью  $S$  находится двумерный идеальный газ из  $N$  молекул. Найти частоту столкновений молекулы такого газа ( $d$  – диаметр молекулы).

4. Найти профиль скорости  $v$  и расход жидкости  $j$  (вытекающий за единицу времени объем) при ламинарном течении жидкости в трубе. Радиус трубы  $r_0$ , длина  $l$ , на концах трубы поддерживается разность давлений  $\Delta p$ .

5. Два тела с постоянными (конечными) теплоемкостями  $C_1$  и  $C_2$  нагреты до разных температур  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ). Найти максимальную работу, которую можно получить, используя эти тела в качестве нагревателя и холодильника в тепловой машине.

6. В цилиндрическом сосуде находится поршень, который может перемещаться без трения. Первоначально поршень делит сосуд на части объемом  $V_0$  каждая. Обе половины сосуда заполнены идеальным газом до давления  $p_0$ . Найти работу, которую нужно совершить, чтобы, медленно двигая поршень, сжать газ в одной из частей сосуда вдвое. Сосуд теплоизолирован. Рассмотреть случаи: а) поршень не проводит тепло; б) поршень проводит тепло.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.