

**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**



УТВЕРЖДАЮ  
 Декан ФФ, д.ф.-м.н  
 В.Е.Блинов  
 2022 г.

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

**направление подготовки: 03.03.02 Физика**  
**Направленность (профиль): все профили**

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	Семинары	Практические занятия	Лабораторные занятия	Консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2	216	48	64			16	64	18	4			2
Всего 216 часов/ 6 зачетных единиц, из них: - контактная работа 134 часа Компетенции : ОПК-2												

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

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	3
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 .....	5
5. Перечень учебной литературы.....	11
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. .	11
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	11
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.....	11
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	12
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	12

## 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-2.

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ОПК-2. Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные	<p><b>ОПК - 2.1.</b> Применяет теоретические основы и базовые знания для проведения научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики.</p> <p><b>ОПК – 2.2.</b> Применяет современную приборную базу (в том числе сложное физическое оборудование) для организации научного исследования.</p> <p><b>ОПК – 2.3.</b> Применяет различные методы обработки и системы анализа экспериментальных данных.</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 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 по направлению подготовки **03.03.02 Физика** 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.**

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	Семинары	Практические занятия	Лабораторные занятия	Консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2	216	48	64			16	64	18	4			2
Всего 216 часов/ 6 зачетных единиц, из них: - контактная работа 134 часа												
Компетенции : ОПК-2												

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

Программой предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контрольные работы, обязательные задания для самостоятельного решения, посещение занятий;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость дисциплины «Молекулярная физика» составляет 6 зачетных единиц:

- занятия лекционного типа – 48 часов,
- практические занятия – 64 часа,
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 64 часа
- промежуточной аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации, экзамен) – 24 часа.

**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.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)					Сам. работа в течение семестра (не вкл. период сессии)	Консультации перед экзаменом (часов)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы						
				Лекции	Практические занятия	Консультации во время занятий				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>Идеальный газ</b>										
1	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.	1	11	4	4		3			
2	Распределение Максвелла по скоростям движения. Средняя, среднеквадратичная и наиболее вероятная скорости молекул. Молекулярные потоки и пучки. Давление идеального газа. Уравнение состояния.	2	11	2	4		5			
3	Барометрическая формула. Распределение Больцмана. Связь распределения Больцмана с распределением Максвелла. Центрифугирование, разделение изотопов. Диэлектрическая поляризация. Опыты Перрена.	3	11	4	4		3			
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.	4	11	2	4		5			

5	<p>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.</p>	5	11	4	4		3		
<b>Диффузия, теплопроводность, вязкость</b>									
6	<p>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.</p>	6	10	2	4		4		
7	<p>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.</p>	7	12	4	4		4		
8	<p>Проведение потоковой контрольной. Разбор, обсуждение и решение задач.</p>	8	14		2	8	4		
<b>Законы термодинамики</b>									
9	<p>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,</p>	8	10	2	4		4		

	политропический процесс. Скорость звука в идеальном газе.								
10	Циклические процессы. Преобразование теплоты в работу, КПД циклов. Цикл Карно. Тепловые насосы, холодильная машина. Цикл Отто. Обратный цикл: холодильная машина, тепловой насос.	9	11	2	4		3		
11	Второе начало термодинамики. Эквивалентность различных формулировок второго начала термодинамики. Теорема Карно. Теорема о приведённых теплотах. Неравенство Клаузиуса. Термодинамическая шкала температур. Закон возрастания энтропии.	10	11	4	4		5		
12	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.	11	11	4	4		3		
<b>Фазовые и химические превращения</b>									
13	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.	12	11	2	4		5		
14	Фазовые переходы первого и второго рода. Химический потенциал. Условие фазового равновесия. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Испарение и кипение, возгонка (сублимация) и осаждение (десублимация). Равновесие	13	11	4	4		3		

	трех фаз. Метастабильные состояния, камера Вильсона и пузырьковая камера. Химическое равновесие в идеальном газе.								
<b>Растворы, гетерогенные системы, поверхности</b>									
15	Поверхностное натяжение жидкости. Краевой угол. Капиллярные силы. Формула Лапласа. Давление пара над искривленной поверхностью, капиллярная конденсация.	14	12	4	4		4		
16	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.	14	8	3	3		2		
17	Гетерогенные системы. Адсорбция на твердые поверхности. Коллоидные растворы и взвеси. Гидрофобный эффект и самоорганизация амфифильных молекул в водном окружении.	15	3	1	1		1		
18	Проведение потоковой контрольной. Разбор задач по пройденным темам.	16-17	13		2	8	3		
20	Самостоятельная подготовка обучающегося в период сессии		18						18
21	Экзамен		2					4	2
<b>Всего</b>			<b>216</b>	<b>48</b>	<b>64</b>	<b>16</b>	<b>64</b>	<b>4</b>	<b>20</b>

### Программа практических занятий (64 часа)

(номера для решения задач даются по задачкам [3-6] из списка литературы, см. п.5 настоящей Программы)

#### *Идеальный газ*

*Занятие 1.* 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.

*Занятие 2.* Средние значения скорости и энергии молекул. Флуктуации параметров. Доля молекул, скорости которых больше заданной.

Задачи: № 2.7, 2.9, 2.10, 2.12.

*Занятие 3.* 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.



*Занятие 4.* Силовое воздействие молекулярного потока.

Задачи: № 2.28, 2.32, 4.27.

*Занятие 5.* Распределения в потоке для различных физических систем.

Задачи: № 2.24, 2.25, 2.27, 2.29, 2.31, 2.33, 4.26.

*Занятие 6.* Применение статистических методов для анализа физических систем.

Задачи: № 2.13, 4.23, 4.24, 4.25, 2.14, 2.34.

*Занятие 7.* 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.

*Занятие 8.* 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.

*Занятие 9.* 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

*Занятие 10.* 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

*Занятие 11.* Одноатомный газ. Распределение по относительным скоростям. Столкновение молекул. Длина свободного пробега.

Задачи: № 3.2-3.4.

*Занятие 12.* Столкновение молекул. Смесь газов. Распределение по длинам свободного пробега.

Задачи: № 4.35, 4.36, 3.5, 3.7, 4.37.

### ***Диффузия, теплопроводность, вязкость***

*Занятие 13.* Явления переноса в плотном газе: диффузия, теплопроводность, вязкость. Оценочные значения коэффициентов переноса. Диффузия.

Задачи: № 3.8, 3.12, 3.9.

*Занятие 14.* Стационарный теплообмен и ламинарное течение.

Задачи: № 3.13, 3.15, 3.16, 3.18, 3.21, 3.22.

*Занятие 15.* Явления переноса в ультраразреженных газах. Нестационарные процессы.

Задачи: № 3.24, 3.25, 3.26, 3.28, 3.29.

*Занятие 16.* Явления переноса в ультраразреженных газах. Стационарные процессы.

Задачи: №3.34—3.36, 3.38.

*Занятие 17.* Броуновское движение и подвижность.

Задачи: № 3.42 — 3.45.

*Занятие 18.* Контрольная работа (2 часа).

### ***Законы термодинамики***

*Занятие 19.* 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  $p$ ,  $V$ . Вычислить: работу  $A$ , совершенную газом; количество теплоты  $Q$ , полученное им; изменение внутренней энергии  $\Delta U$ ; теплоемкость  $C$ . Получить соотношение Майера. Считать молярные теплоемкости  $C_p$  и  $C_V$  известными и постоянными.  
№ 1.8, 1.12, 1.14.

*Занятие 20.* Работа и количество теплоты. Внутренняя энергия системы. Первое начало термодинамики. Теплоемкость. Неравновесные процессы.

Задачи: № 1.22, 4.4, 1.17, 1.20.

*Занятие 21.* Циклические процессы. Цикл Карно.

Задачи: № 1.23, 1.24, 1.25, 4.6, 4.8.

*Занятие 22.* Цикл Карно. Неравенство Клаузиуса. Получение максимальной работы.

Задачи: № 1.27, 1.28, 1.29, 1.30, 1.31.

*Занятие 23.* Неравенство Клаузиуса. Метод циклов.

Задачи: № 1.35, 1.39, 1.40, 1.41, 1.42.

*Занятие 24.* Энтропия — функция состояния.

Задачи: Для одного моля идеального газа рассмотреть следующие равновесные процессы: изохорический, изобарический, изотермический, адиабатический и политропический. Вычислить изменение энтропии  $\Delta S$ .  
№ 1.43, 1.44.

*Занятие 25.* Энтропия системы. Второе начало термодинамики. Изменение энтропии в неравновесных процессах без подвода тепла

Задачи: № 1.45, 1.46, 1.47.

*Занятие 26.* Энтропия системы. Второе начало термодинамики. Вычисление изменения энтропии в сложных процессах.

Задачи: № 1.48, 1.51, 1.52.

### ***Фазовые и химические превращения, растворы, гетерогенные системы, поверхности***

*Занятие 27.* Определение критических параметров для газа Ван-дер-Ваальса. Термодинамические свойства газа Ван-дер-Ваальса.

Задачи №1.1, 1.2, 1.77, 1.79.

*Занятие 28.* Химический потенциал.

Задачи: № 1.99 – 1.101.

*Занятие 29.* Процесс Джоуля-Томсона. Равновесие фаз.

Задачи: № 1.62, 1.103, 1.106, 1.108, 1.109, 1.110.

*Занятие 30.* Поверхностное натяжение. Давление под искривленной поверхностью.

Задачи: № 1.113 – 1.117.

*Занятие 31.* Термодинамика поверхности. Метод циклов. Давление насыщенного пара над искривленной поверхностью.

Задачи: № 1.118, 1.121, 1.122, 1.123.

Занятие 32. Контрольная работа (2 часа).

### 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 ОПК-2. 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. Итоги промежуточной аттестации (экзамена) оцениваются по пятибалльной шкале:

Для получения оценки **«отлично»** необходимо развёрнуто ответить на оба вопроса и решить без ошибок задачу. Также надо ответить на дополнительные вопросы по всей дисциплине (продвинутый уровень освоения компетенций).

Для получения оценки **«хорошо»** нужно ответить на оба вопроса билета и решить задачу. Допускается несколько несущественных ошибок. Необходимо также ответить на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины (базовый уровень освоения компетенций).

Для получения оценки **«удовлетворительно»** за ответы на вопросы, содержащиеся в билете, необходимо:

- ответить хотя бы на один вопрос в билете по теории и решить задачу, при решении задачи допускаются ошибки, не влияющие на общий способ предлагаемого решения. Необходимо также ответить на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для изученной дисциплины (пороговый уровень освоения компетенций).

Оценка **«неудовлетворительно»** ставится, когда уровень усвоения компетенций не сформирован.

#### Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
<b>ОПК - 2.1.</b> Применяет теоретические основы и базовые знания для проведения научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики.	<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 термодинамических потенциалов и условия равновесия фаз.	Решение задач, проведение контрольных работ, экзамен.
<b>ОПК – 2.2.</b> Применяет современную приборную базу (в том числе сложное физическое оборудование) для организации научного исследования.	<b>Уметь</b> рассчитывать равновесные и кинетические параметры молекулярных систем на основе молекулярных распределений	Решение задач, проведение контрольных работ, экзамен.
<b>ОПК – 2.3.</b> Применяет различные методы обработки и системы анализа экспериментальных данных.	<b>Анализировать</b> основные уравнения и технику расчета физических параметров (коэффициент полезного действия и холодильный коэффициент, теплоёмкости) различных термодинамических процессов для различных термодинамических систем.	Решение задач, проведение контрольных работ, экзамен.

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

Таблица 10.2

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
ОПК-2.1	Полнота знаний	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
ОПК-2.2	Наличие умений	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
ОПК-2.3	Наличие знаний и умений	Уровень знаний ниже минимальных. Не умеет решать стандартные задачи и требования. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания.



### 10.3 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  $\omega = 50$  с<sup>-1</sup>. 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,  $t_1 = 93$  °С  $t_2 = 0$  °С

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.

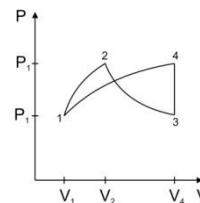
2. Идеальный газ сжимается под поршнем в цилиндре так, что уходящее в окружающую среду тепло равно изменению внутренней энергии газа. Определить работу, затраченную на сжатие моля газа при изменении объема в два раза. Чему равна теплоемкость в этом процессе? Начальная температура газа  $T_0$ .

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

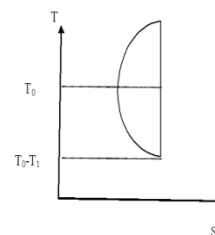
4. Один моль  $H_2O$  с температурой  $25$  °С охлаждается до  $0$  °С и замерзает. Все тепло, полученное охлаждающей машиной, работающей с максимальной теоретически допустимой эффективностью, передается другому молю  $H_2O$  при  $25$  °С в результате чего его температура повышается до  $100$  °С сколько молей  $H_2O$  переходит в пар при  $100$  °С Теплота испарения при  $100$  °С равна  $9730$  кал/моль. Теплота плавления льда при  $0$  °С 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  $t_1 = 210$  °С, температура воды в отопительной системе  $t_2 = 60$  °С, грунтовой воды  $t_3 = 15$  °С.

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.

### Форма экзаменационного билета

<p><b>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</b></p> <p><b>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования</b> <b>«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»</b> <b>(Новосибирский государственный университет, НГУ)</b></p> <p><b>Физический факультет</b></p>
<p><b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</b></p> <p>1 ..... 2 .....</p> <p>Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)</p> <p>« ____ » _____ 20 г.</p>

## 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 требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы по дисциплине  
«Молекулярная физика» по направлению подготовки  
направление подготовки: 03.03.02 Физика  
Направленность (профиль): все профили**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного