

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Общая физика: термодинамика и молекулярная физика
<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра общей физики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 90 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Количество контрольных работ, заданий: 3

Программу составили:

Э.В. Прут, д-р хим. наук, профессор, профессор

В.С. Булыгин, канд. физ.-мат. наук, доцент, профессор

К.М. Крымский, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

А.В. Гавриков, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

В.А. Овчинкин, канд. техн. наук, доцент, доцент

Н.А. Кириченко, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор

П.В. Попов, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры общей физики 04.06.2020

## Аннотация

Курс общей физики является переходным от школьной физики к курсам теоретической физики и специализированным курсам экспериментальной физики. Для освоения дисциплины «Термодинамика и молекулярная физика» обучающийся должен обладать знаниями и умениями в объёме курса физики и математики средней школы.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

Освоение студентами базовых знаний в области механики для дальнейшего изучения других разделов физики и углубленного изучения фундаментальных основ статистической физики и физической кинетики.

#### Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся базовых знаний в области термодинамики и молекулярной физики
- формирование умений и навыков применять изученные теоретические законы и математические инструменты для решения различных физических задач
- формирование общефизической культуры: умения выделять существенные физические явления и пренебрегать несущественными; умения проводить оценки физических величин; умения строить простейшие теоретические модели, описывающие физические процессы

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- ☐ фундаментальные законы и понятия термодинамики и молекулярной физики, а также границы их применимости:
- ☐ основные законы термодинамики (1, 2, 3 «начала»)
- ☐ понятие о равновесных и неравновесных процессах, термодинамическое определение энтропии, закон возрастания энтропии, энтропия идеального газа
- ☐ основы молекулярно-кинетической теории (основное уравнение МКТ, длина свободного пробега, распределения Больцмана, Максвелла)
- ☐ основы статистической физики (статистический смысл энтропии, понятие о распределении Гиббса)
- ☐ основы квантовой теории теплоёмкости (степени свободы и их возбуждение, характеристические температуры, закон Дюлонга-Пти)
- ☐ основы теории фазовых переходов (фазовые диаграммы, теплоты переходов, уравнение Клапейрона-Клаузиуса)
- ☐ основные законы поверхностного натяжения (коэффициент поверхностного натяжения, формула Лапласа, внутренняя энергия единицы поверхности)
- ☐ основы теории процессов переноса: диффузия, теплопроводность, вязкость. Коэффициенты переноса в газовых средах. Броуновское движение, закон Эйнштейна-Смолуховского. Связь между подвижностью и коэффициентом диффузии.

уметь:

- ☐ применять изученные общие физические законы для решения конкретных задач механики:
- ☐ применять законы сохранения для расчёта процессов сжатия/расширения газов, в том числе: для расширения газа в пустоту; истечение газов из малого отверстия; течение в условиях эффекта Джоуля-Томсона
- ☐ рассчитывать КПД равновесных циклов тепловых и холодильных машин, в том числе заданных в координатах TS
- ☐ рассчитывать изменение энтропии в неравновесных процессах, а также максимальную и минимальную работы систем
- ☐ рассчитывать тепловые процессы с учётом наличия фазовых переходов и эффектов поверхностного натяжения
- ☐ рассчитывать тепловые процессы для неидеальных газов (для уравнения Ван-дер-Ваальса)
- ☐ пользоваться вероятностными распределениями, уметь вычислять средние значения и среднеквадратичные отклонения параметров для случаев распределений Больцмана и Максвелла.
- ☐ рассчитывать статистический вес и энтропию на основе статистической теории для простейших систем с дискретными энергетическими уровнями
- ☐ рассчитывать скорость переноса вещества (или тепла) при диффузии (или теплопроводности) в стационарных и квазистационарных случаях
- ☐ анализировать физические задачи, выделяя существенные и несущественные аспекты явления, и на основе проведённого анализа строить упрощённые теоретические модели физических явлений;
- ☐ применять различные математические инструменты решения задач исходя из сформулированных физических законов, и проводить необходимые аналитические и численные расчёты;

владеть:

- ☐ основными методами решения задач термодинамики и молекулярной физики;
- ☐ основными математическими инструментами, характерными для задач термодинамики и молекулярной физики.

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

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа

1	Основные понятия молекулярной физики	2			3
2	Термодинамические процессы. Первое начало термодинамики	2	2		6
3	Второе начало термодинамики. Энтропия.	4	4		12
4	Термодинамические функции и их свойства	2	4		9
5	Фазовые переходы	2	2		6
6	Реальные газы	2	2		6
7	Поверхностные явления.	2	2		6
8	Элементы теории вероятностей.	2	2		6
9	Распределения Максвелла и Больцмана.	2	2		6
10	Основы статистической физики.	2	2		6
11	Теория теплоёмкостей.	2	2		6
12	Флуктуации.	2	2		6
13	Элементы физической кинетики.	2	2		6
14	Броуновское движение. Явления переноса в разрежённых газах.	2	2		6
Итого часов		30	30		90
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Основные понятия молекулярной физики

Основные понятия молекулярной физики и термодинамики: предмет исследования, его характерные особенности. Задачи молекулярной физики. Макроскопические параметры. Агрегатные состояния вещества. Уравнения состояния (термическое и калорическое). Идеальный и неидеальный газы. Давление идеального газа как функция кинетической энергии молекул. Соотношение между температурой идеального газа и кинетической энергией его молекул. Законы идеальных газов. Уравнения состояния идеального газа.

Термодинамическая система. Термодинамические параметры. Нулевое начало термодинамики. Определение температуры идеального газа. Равновесное и неравновесное состояния. Квазистатические, обратимые и необратимые термодинамические процессы.

##### 2. Термодинамические процессы. Первое начало термодинамики

Работа, теплота, внутренняя энергия. Функции состояния. Термическое и калорическое уравнения состояния. Первое начало термодинамики. Циклические процессы. Работа при циклическом процессе.

Теплоёмкость. Теплоёмкость идеальных газов при постоянном объёме и постоянном давлении, уравнение Майера.

Адиабатический и политропический процессы. Уравнения адиабаты и политропы для идеального газа. Независимость внутренней энергии идеального газа от объёма.

Скорость звука в газах. Энтальпия. Зависимость энтальпии идеального газа от давления. Скорость истечения газа из отверстия.

##### 3. Второе начало термодинамики. Энтропия.

Формулировки второго начала. Тепловая машина. Определение КПД тепловой машины. Цикл Карно. Теорема Карно. Неравенство Клаузиуса. Максимальность КПД цикла Карно по сравнению с другими термодинамическими циклами.

Холодильная машина. Эффективность холодильной машины. Тепловой насос. Эффективность теплового насоса, работающего по циклу Карно. Связь между коэффициентами эффективности теплового насоса и холодильной машины.

Термодинамическое определение энтропии. Закон возрастания энтропии. Энтропия идеального газа. Энтропия в обратимых и необратимых процессах. Адиабатическое расширение идеального газа в вакуум. Объединённое уравнение первого и второго начал термодинамики.

Третье начало термодинамики. Изменение энтропии и теплоёмкости при приближении температуры к абсолютному нулю.

#### 4. Термодинамические функции и их свойства

Свойства термодинамических функций. Максимальная и минимальная работа. Преобразования термодинамических функций. Соотношения Максвелла. Зависимость внутренней энергии от объёма. Зависимость теплоёмкости от объёма. Соотношение между  $C_P$  и  $C_V$ .

Теплофизические свойства твёрдых тел. Термодинамика деформации твёрдых тел. Изменение температуры при адиабатическом растяжении упругого стержня. Тепловое расширение как следствие ангармоничности колебаний в решётке. Коэффициент линейного расширения стержня.

#### 5. Фазовые переходы

Фазовые переходы I и II рода. Химический потенциал. Условие равновесия фаз. Кривая фазового равновесия. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Диаграмма состояния двухфазной системы «жидкость–пар». Зависимость теплоты фазового перехода от температуры. Критическая точка. Тройная точка. Диаграмма состояния «лёд–вода–пар». Метастабильные состояния. Перегретая жидкость и переохлаждённый пар.

#### 6. Реальные газы

Газ Ван-дер-Ваальса как модель реального газа. Изотермы газа Ван-дер-Ваальса. Уравнение адиабаты газа Ван-дер-Ваальса. Правило Максвелла и правило рычага. Критические параметры и приведённое уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса. Внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса. Адиабатическое расширение газа Ван-дер-Ваальса в вакуум. Энтропия газа Ван-дер-Ваальса. Эффект Джоуля–Томсона. Адиабатическое расширение, дросселирование.

#### 7. Поверхностные явления.

Термодинамика поверхности. Свободная энергия поверхности. Краевые углы. Смачивание и несмачивание. Формула Лапласа. Зависимость давления пара от кривизны поверхности жидкости. Кипение. Роль зародышей при образовании новой фазы.

#### 8. Элементы теории вероятностей.

Условие нормировки. Средние величины и дисперсия. Биномиальный закон распределения. Распределение Пуассона. Распределение Гаусса.

#### 9. Распределения Максвелла и Больцмана.

Распределения Максвелла. Распределение частиц по компонентам скорости и абсолютным значениям скорости. Доля молекул, лежащих в заданном интервале скоростей. Наиболее вероятная, средняя и среднеквадратичная скорости. Распределения Максвелла по энергиям. Среднее число ударов молекул, сталкивающихся в единицу времени с единичной площадкой. Средняя энергия молекул, вылетающих в вакуум через малое отверстие в сосуде.

Распределение Больцмана в однородном поле сил. Барометрическая формула. Распределение Максвелла–Больцмана.

#### 10. Основы статистической физики.

Динамические и статистические закономерности. Макроскопические и микроскопические состояния. Фазовое пространство. Представление о распределении Гиббса. Микро- и макросостояния. Статистический вес макросостояния. Статистическая сумма и её использование для нахождения внутренней энергии. Энергия, теплоёмкость, энтропия газа, молекулы которого имеют два дискретных энергетических уровня.

Статистическое определение энтропии. Аддитивность энтропии. Закон возрастания энтропии. Статистическая температура. Энтропия при смешении газов. Парадокс Гиббса.

#### 11. Теория теплоёмкостей.

Классическая теория теплоёмкостей. Закон равном распределения энергии теплового движения по степеням свободы. Теплоёмкость кристаллов (закон Дюлонга–Пти). Элементы квантовой теории теплоёмкостей. Характеристические температуры. Зависимость теплоёмкости от температуры.

#### 12. Флуктуации.

Средние значения энергии и дисперсии (среднеквадратичной флуктуации) энергии частицы. Флуктуации и распределение Гаусса. Флуктуации термодинамических величин. Флуктуация температуры в фиксированном объёме. Флуктуация объёма в изотермическом и адиабатическом процессах. Флуктуации аддитивных физических величин. Зависимость флуктуаций от числа частиц, составляющих систему. Влияние флуктуаций на чувствительность измерительных приборов (на примере пружинных весов).

#### 13. Элементы физической кинетики.

Столкновения. Эффективное газокINETическое сечение. Длина свободного пробега. Распределение молекул по длинам свободного пробега. Число столкновений молекул между собой. Явления переноса: вязкость, теплопроводность и диффузия. Законы Фика и Фурье. Коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии в газах.

#### 14. Броуновское движение. Явления переноса в разрежённых газах.

Подвижность. Закон Эйнштейна–Смолуховского. Связь подвижности частицы и ко-эффициента диффузии. Эффект Кнудсена. Эффузия. Течение разрежённого газа через прямолинейную трубу.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

- Лекционная аудитория, оснащённая мультимедийным проектором и экраном
- Оборудование для лекционных демонстраций
- Учебные аудитории, оснащённые доской
- Доступ к библиотекам учебной технической литературы, в том числе электронным, необходимый для осуществления самостоятельной работы обучающихся

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Общий курс физики [Текст] : в 5 т. Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика : учеб. пособие для вузов / Д. В. Сивухин. — 5-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2005, 2006, 2011, 2014. — 544 с.

2. Основы физики [Текст] : Курс общей физики : в 2 т. Т. 2 : учебник для вузов. Квантовая и статистическая физика. Термодинамика / В. Е. Белонучкин, Д. А. Заикин, Ю. М. Ципенюк ; под ред. Ю. М. Ципенюка .— 2-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2007 .— 608 с.
3. Краткий курс термодинамики [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Е. Белонучкин ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т .— 2-е изд., перераб. и доп. — М. : МФТИ, 2010 .— 164 с.
4. Термодинамика, статистическая и молекулярная физика [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. А. Кириченко .— 4-е изд., испр. и доп. — М. : Физматкнига, 2012 .— 192 с.
5. Лабораторный практикум по общей физике [Текст] : в 3 т. Т. 1 : Термодинамика и молекулярная физика : учеб. пособие для вузов / под ред. А. Д. Гладуна ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т .— 3-е изд., испр. — М. : МФТИ, 2012 .— 292 с.
6. Сборник задач по общему курсу физики [Текст] : в 3 ч. Ч. 1 : Механика. Термодинамика и молекулярная физика : учеб. пособие для вузов / под ред. В. А. Овчинкина .— 3-е изд., испр. и доп. — М. : Физматкнига, 2013 .— 560 с
7. Сборник задач по общему курсу физики [Текст] : в 3 ч. Ч. 1 : учеб. пособие для вузов. Механика. Термодинамика и молекулярная физика / под ред. В. А. Овчинкина .— 4-е изд., испр. — М. : Физматкнига, 2016 .— 560 с.
8. Калашников Н.П., Смондырев М.А./Основы физики в 2-х томах М.-Лаборатория знаний, 2017

#### Дополнительная литература

1. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика [Текст] : учеб. пособ. для вузов / Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер, Е. М. Лифшиц .— 2-е изд., испр. — М. : Наука, 1969 .— 400 с.
2. Молекулярная физика и термодинамика [Текст] : Основные положения и решение задач : учеб. пособие для вузов / П. Ф. Коротков ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т .— 3-е изд., испр. и доп. — М. : МФТИ, 2009 .— 168 с.
3. Методы решения задач в общем курсе физике. Термодинамика и молекулярная физика [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / В. П. Корявов .— М. : Высшая школа, 2009 .— 358 с.
4. Энтропия [Текст] : уч. пособие для вузов : рек. УМО Моск. физико-техн. ин-та / Д. А. Заикин ; М-во образов. РФ, Моск. физико-техн. ин-т .— М. : МФТИ, 2003 .— 56 с.
5. Элементы статистической механики, термодинамики и кинетики [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / И. Ф. Щеголев .— 2-е изд., испр. — Долгопрудный : Интеллект, 2008 .— 208 с.

#### Рекомендованная литература для самостоятельного изучения.

1. Статистическая физика [Текст] : Т. 5 / Ф. Рейф ; пер. с англ. ; под ред. А. И. Шальникова, А. О. Вайсенберга .— М. : Наука, 1972 .— 352 с.
2. Термодинамика [Текст] : учебник для ун-тов / И. П. Базаров .— 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1991 .— 376 с.
3. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур [Текст] : [учебник для вузов] / И. Пригожин, Д. Кондепуди ; пер. с англ. Ю. А. Данилова, В. В. Белого ; под ред. Е. П. Агеева .— М. : Мир, 2002 .— 461 с.
4. Некоторые задачи теории теплопроводности [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. С. Булыгин ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : Изд-во МФТИ, 2006 .— 64 с.
5. Термодинамика, статистическая физика и кинетика [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. Б. Румер, М. Ш. Рывкин .— / 3-е изд., перераб. — Новосибирск : Изд-во Новосибир. ун-та, 2000, 2001 .— 608 с.
6. Прут Э.В., Кленов С.Л., Овсянникова О.Б. Введение в теорию вероятностей в молекулярной физике. — М.: МФТИ. 2002.
7. Прут Э.В., Кленов С.Л., Овсянникова О.Б. Элементы теории флуктуаций и броуновского движения в молекулярной физике. — М.: МФТИ., 2002.
8. Прут Э.В. Теплофизические свойства твёрдых тел. — М.: МФТИ. 2009.
9. Булыгин В.С. Теоремы Карно. — М.: МФТИ, 2012.
10. Булыгин В.С. Теплоёмкость и внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса. — М.: МФТИ, 2012.
11. Попов П.В. Диффузия. Ч.1. Элементарная теория, Ч. 2. Случайные блуждания — М.: МФТИ, 2016.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

1. [http://mipt.ru/education/chair/physics/S\\_II/method/](http://mipt.ru/education/chair/physics/S_II/method/) — методический раздел сайта кафедры Общей физики
2. <http://lib.mipt.ru/catalogue/1412/?t=750> — электронная библиотека МФТИ, раздел «Общая физика»

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

Литература, рекомендуемая к курсу, доступна в электронном виде (см. п. [1,2] перечня ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)), так что студенты могут читать учебники прямо со своих планшетов.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий курс «Общая физика: термодинамика и молекулярная физика», должен не только изучить общие физические законы и понятия, но научиться применять их на практике.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- подготовку к практическим занятиям, контрольной работе, сдаче заданий, экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач. При решении задач каждое действие необходимо аргументировать, ссылаясь на известные теоретические сведения и проводить все необходимые вычисления, доводя задачу до конечного ответа. Задача считается решённой, если она содержит обоснованное решение: ссылки на применяемые физические законы и корректные выкладки, а также правильный численный ответ (если в задаче есть числовые данные).

При подготовке к практическим занятиям необходимо ознакомиться с основными понятиями и законами, которыми будет посвящено занятие, и решить задачи, предусмотренные для подготовки по теме семинара.

В курсе широко используются понятия и методы математического анализа функций многих переменных и теории вероятностей. Эти дисциплины изучаются параллельно с курсом общей физики. Если студент сталкивается с математическим понятием, которое еще не было изучено в рамках упомянутых математических курсов, он должен предварительно ознакомиться с соответствующим разделом математики самостоятельно. Необходимый минимум математических сведений излагается как на лекциях, так и в основной учебной литературе, рекомендуемой для изучения данной дисциплины.

Промежуточный контроль знаний проводится в виде контрольной работы, на которой студенту предлагается решить пять задач по пройденным темам в формате, аналогичном письменному экзамену. Для проверки знаний, а также понимания и владения материалом, в процессе сдачи заданий преподаватель может задавать студенту дополнительные теоретические вопросы по программе курса или давать для решения дополнительные задачи. Обязательным требованием является выполнение домашних работ, которые оформляются в специально отведённой для этого тетради и систематически сдаются на проверку.



На письменном экзамене студенту предлагается решить 5 задач. Тематика задач полностью соответствует программе курса, однако все задачи письменного экзамена являются полностью оригинальными. На экзамене студентам разрешено пользоваться любой справочной или учебной литературой. Такая форма экзамена исключает бездумное заучивание законов и направлена на проверку глубины понимания материала и способности самостоятельно применять физические законы в нестандартной ситуации.

Помимо изучения разделов механики, обозначенных в программе курса, студенту рекомендуется самостоятельно изучать различные вопросы, относящиеся к общей физике (механике), возможно выходящие за рамки программы, расширяя таким образом свой физический кругозор. На экзамене студенту предлагается в качестве одного из пунктов билета выбрать и рассказать любой заранее подготовленный теоретический или экспериментальный вопрос, имеющий отношение к пройденному курсу (это может быть либо углубленное изложение одного из вопросов программы курса либо вопрос, не затрагиваемый в программе курса, который однако может быть рассмотрен в рамках изученного курса), продемонстрировав таким образом способность самостоятельно разбираться в различных вопросах и задачах физики, основываясь на применении единых общеприродных законов.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра общей физики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчики:**

Э.В. Прут, д-р хим. наук, профессор, профессор  
В.С. Булыгин, канд. физ.-мат. наук, доцент, профессор  
К.М. Крымский, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент  
А.В. Гавриков, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент  
В.А. Овчинкин, канд. техн. наук, доцент, доцент  
Н.А. Кириченко, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор  
П.В. Попов, канд. физ.-мат. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Общая физика: термодинамика и молекулярная физика» обучающийся должен:

### знать:

- ☐ фундаментальные законы и понятия термодинамики и молекулярной физики, а также границы их применимости:
- ☐ основные законы термодинамики (1, 2, 3 «начала»)
- ☐ понятие о равновесных и неравновесных процессах, термодинамическое определение энтропии, закон возрастания энтропии, энтропия идеального газа
- ☐ основы молекулярно-кинетической теории (основное уравнение МКТ, длина свободного пробега, распределения Больцмана, Максвелла)
- ☐ основы статистической физики (статистический смысл энтропии, понятие о распределении Гиббса)
- ☐ основы квантовой теории теплоёмкости (степени свободы и их возбуждение, характеристические температуры, закон Дюлонга-Пти)
- ☐ основы теории фазовых переходов (фазовые диаграммы, теплоты переходов, уравнение Клапейрона-Клаузиуса)
- ☐ основные законы поверхностного натяжения (коэффициент поверхностного натяжения, формула Лапласа, внутренняя энергия единицы поверхности)
- ☐ основы теории процессов переноса: диффузия, теплопроводность, вязкость. Коэффициенты переноса в газовых средах. Броуновское движение, закон Эйнштейна-Смолуховского. Связь между подвижностью и коэффициентом диффузии.

### уметь:

- ☐ применять изученные общие физические законы для решения конкретных задач механики:
- ☐ применять законы сохранения для расчёта процессов сжатия/расширения газов, в том числе: для расширения газа в пустоту; истечение газов из малого отверстия; течение в условиях эффекта Джоуля-Томсона
- ☐ рассчитывать КПД равновесных циклов тепловых и холодильных машин, в том числе заданных в координатах TS
- ☐ рассчитывать изменение энтропии в неравновесных процессах, а также максимальную и минимальную работы систем
- ☐ рассчитывать тепловые процессы с учётом наличия фазовых переходов и эффектов поверхностного натяжения
- ☐ рассчитывать тепловые процессы для неидеальных газов (для уравнения Ван-дер-Ваальса)
- ☐ пользоваться вероятностными распределениями, уметь вычислять средние значения и среднеквадратичные отклонения параметров для случаев распределений Больцмана и Максвелла.
- ☐ рассчитывать статистический вес и энтропию на основе статистической теории для простейших систем с дискретными энергетическими уровнями
- ☐ рассчитывать скорость переноса вещества (или тепла) при диффузии (или теплопроводности) в стационарных и квазистационарных случаях
- ☐ анализировать физические задачи, выделяя существенные и несущественные аспекты явления, и на основе проведённого анализа строить упрощённые теоретические модели физических явлений;
- ☐ применять различные математические инструменты решения задач исходя из сформулированных физических законов, и проводить необходимые аналитические и численные расчёты;

**владеть:**

- ☐ основными методами решения задач термодинамики и молекулярной физики;
- ☐ основными математическими инструментами, характерными для задач термодинамики и молекулярной физики.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

### 3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Промежуточная аттестация по дисциплине «Общая физика: термодинамика и молекулярная физика» осуществляется в форме экзамена. Экзамен состоит из двух частей: проводится в письменной и устной форме.

На письменной части экзамена студенту предлагается решить 5 задач. Все предлагаемые задачи представляют собой оригинальные авторские задачи, специально подготовленные для экзамена. С примерами задач прошлых лет можно ознакомиться на сайте кафедры общей физики в разделе экзаменационных материалов за 2-й семестр [http://mipt.ru/education/chair/physics/S\\_II/ekzams/](http://mipt.ru/education/chair/physics/S_II/ekzams/)

Устная часть экзамена проходит по билетам. В каждом билете содержится теоретический вопрос из приведенного ниже списка экзаменационных вопросов. Кроме того, студенту предлагается изложить подготовленный заранее «вопрос по выбору», которым может быть как один из пунктов приведённого ниже списка, так и любой вопрос, затрагиваемый в изучаемом курсе или непосредственно связанный с ним. В качестве вопроса по выбору могут быть изложены результаты проделанной студентом лабораторной работы.

Список вопросов устного экзамена:

1. Идеальный и неидеальный газы. Давление идеального газа как функция кинетической энергии молекул. Соотношение между температурой идеального газа и кинетической энергией его молекул.
2. Термодинамическая система. Микроскопические и макроскопические параметры. Уравнение состояния. Стационарные, равновесные и неравновесные состояния и процессы.
3. Работа, внутренняя энергия, теплота. Первое начало термодинамики.
4. Работа идеального газа в равновесных изотермическом и изобарическом процессах. Внутренняя энергия идеального газа.
5. Теплоёмкость. Теплоёмкости  $C_V$  и  $C_P$ . Теплоёмкости  $C_V$  и  $C_P$  идеального газа. Формула Майера.
6. Адиабатические и политропические процессы. Уравнение адиабаты и политропы для идеального газа.
7. Цикл Карно, КПД машины Карно. Теоремы Карно.
8. Второе начало термодинамики. Равенство и неравенство Клаузиуса. Энтропия. Закон возрастания энтропии.
9. Энтропия идеального газа.
10. Термодинамические потенциалы. Соотношения Максвелла (соотношения взаимности). Уравнения Гиббса—Гельмгольца.
11. Связь производной  $\partial U/\partial V$  с уравнением состояния
12. Разность  $C_P - C_V$  в общем случае.
13. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона—Клаузиуса. Фазовое равновесие «жидкость—пар». Критическая точка.
14. Зависимость теплоты фазового перехода от температуры.
15. Диаграмма фазового равновесия «лёд—вода—пар». Тройная точка.
16. Уравнение Ван-дер-Ваальса как модель неидеального газа. Изотермы газа Ван-дер-Ваальса. Критические параметры. Приведённое уравнение Ван-дер-Ваальса, закон соответственных состояний.
17. Метастабильные состояния, переохлаждённый пар, перегретая жидкость. Устойчивость состояний. Правило Максвелла.
18. Внутренняя энергия и энтропия газа Ван-дер-Ваальса. Изменение температуры газа Ван-дер-Ваальса при его свободном расширении в вакуум.

19. Интегральный эффект Джоуля—Томсона. Температура инверсии.
20. Поверхностные явления. Коэффициент поверхностного натяжения, краевые углы. Формула Лапласа.
21. Зависимость давления насыщенного пара от кривизны поверхности жидкости.
22. Кипение. Роль зародышей при образовании новой фазы.
23. Распределение Максвелла по скоростям и импульсам частиц. Наиболее вероятная, средняя и среднеквадратичная скорости молекул.
24. Распределение Максвелла по энергиям частиц. Средняя и наиболее вероятная энергии частиц.
25. Среднее число молекул, сталкивающихся в единицу времени с единичной площадкой.
26. Средняя энергия молекул, вылетающих через малое отверстие в сосуде в вакуум.
27. Барометрическая формула. Распределение Больцмана.
28. Микро- и макросостояния. Распределение Гиббса.
29. Статистическая сумма, её применение для нахождения среднего значения энергии подсистемы.
30. Статистическое определение энтропии. Аддитивность энтропии. Закон возрастания энтропии.
31. Изменение энтропии при смешении газов. Парадокс Гиббса.
32. Флуктуация числа частиц в заданном объёме.
33. Флуктуация температуры в заданном объёме.
34. Флуктуация объёма в изотермическом и адиабатическом процессах.
35. Влияние флуктуаций на чувствительность измерительных приборов (на примере пружинных весов).
36. Классическая теория теплоёмкостей. Закон равномерного распределения энергии теплового движения по степеням свободы.
37. Элементы квантовой теории теплоёмкостей. Характеристические температуры. Теплоёмкость кристаллов (закон Дюлонга—Пти).
38. Третье начало термодинамики.
39. Столкновения. Эффективное газокинетическое сечение. Длина свободного пробега. Распределение молекул по длинам свободного пробега.
40. Диффузия. Закон Фика. Коэффициент диффузии. Уравнение диффузии.
41. Теплопроводность. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Уравнение теплопроводности.
42. Вязкость. Закон Ньютона. Коэффициент вязкости.
43. Броуновское движение. Подвижность. Закон Эйнштейна—Смолуховского.
44. Связь подвижности частицы и коэффициента диффузии.
45. Явления переноса в разреженных газах. Эффузия. Эффект Кнудсена. Эффузионное разделение газовых смесей.
46. Течение разреженного газа.

#### 4. Критерии оценивания

По результатам решения задач письменной части экзамена за каждую задачу выставляется от 0 до 3 баллов согласно следующим критериям:

3 балла: Задача решена полностью верно (т. е. приведены правильное обоснованное решение и даны ответы на все вопросы задачи). Возможно наличие мелких недочётов (описки, несущественные арифметические ошибки).

2 балла: Задача решена, ход решения задачи в целом верен, но есть существенные недочёты (ошибки в выкладках, абсурдный ответ и т.п.).

1 балл: Задача не решена, но все основные физические законы, необходимые для решения, сформулированы правильно.

0 баллов: Задача не решена или решена неверно (основные законы записаны с ошибками, либо не полностью, подход к решению задачи принципиально неверен или решение задачи не соответствует условию).

Полученные баллы суммируются и выставляется оценка за письменную часть экзамена по следующей схеме

Оценка	Баллы	Сумма баллов
отлично	10	15
	9	13-14
	8	12
хорошо	7	11
	6	9-10
	5	8
удовлетворительно	4	6-7
	3	5
неудовлетворительно	2	2-4
	1	0-1

Оценка за письменную часть экзамена определяет максимальную итоговую оценку за экзамен. В исключительных случаях, если на устной части экзамена студент демонстрирует превосходные теоретические знания и уровень понимания предмета, итоговая оценка может быть повышена, но не более, чем на 2 балла по 10-балльной шкале.

На устном экзамене преподаватель оценивает ответ студента в целом и выставляет оценку согласно приведённым ниже критериям и изложенным выше замечаниям касательно письменной части экзамена:

Оценка **«отлично (10)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания учебной программы и за её пределами, а также умение уверенно применять их на практике при решении сложных нестандартных задач.

Оценка **«отлично (9)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания учебной программы и умение уверенно применять их на практике при решении нестандартных задач.

Оценка **«отлично (8)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания учебной программы и умение уверенно применять их на практике при решении нестандартных задач, однако допустившему некоторые неточности при ответе.

Оценка **«хорошо (7)»** выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание и уверенное понимание материала учебной программы и умение свободно применять физические законы на практике при решении типовых задач.

Оценка **«хорошо (6)»** выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание материала учебной программы и умение применять физические законы на практике при решении типовых задач.

Оценка «хорошо (5)» выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание и понимание материала учебной программы и умение применять физические законы на практике при решении типовых задач, однако допустил при ответе ряд грубых неточностей.

Оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, показавшему фрагментарный характер знаний, допускавшему неточности в формулировке основных законов и базовых понятий, но при этом продемонстрировавшему способность решать простые задачи и владение основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения.

Оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту, показавшему сильно фрагментарный характер знаний, допускавшему грубые ошибки в формулировке основных законов и базовых понятий, но при этом продемонстрировавшему способность решать простые задачи и владение основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения.

Оценка «неудовлетворительно (2)» или «неудовлетворительно (1)» выставляется студенту, который не знает значительную часть основного содержания программы, систематически допускает грубые ошибки при формулировании основных физических законов или не способен корректно применять физические законы даже для решения простых задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

### **Порядок проведения письменного экзамена.**

Время проведения письменной части экзамена составляет 4 астрономических часа. На экзамене предлагаются для решения 5 оригинальных задач. Темы соответствуют темам семинарских занятий. Задача считается решённой, если она содержит обоснованное решение: ссылки на применяемые физические законы и корректные выкладки, а также правильный численный ответ (если в задаче есть числовые данные). На экзамене разрешается пользоваться любыми записями и учебными пособиями в бумажном виде. Категорически запрещается включать любые устройства, которые могут служить средствами связи – ноутбуки, планшеты, телефоны и т.п. Нарушители удаляются с экзамена с оценкой «неудовлетворительно». Разрешается пользоваться калькуляторами. Запрещается пользоваться калькуляторами в мобильных телефонах, ноутбуках и т.п.

### **Порядок проведения устного экзамена.**

Экзамен проходит в традиционной форме беседы преподавателя со студентом по теме экзаменационного билета. Экзаменационный билет содержит два пункта: «вопрос по выбору» и один вопрос из программы курса.

«Вопрос по выбору» студент готовит самостоятельно до экзамена. Выбор темы осуществляется при консультации преподавателя, ведущего семинарские задания. Вопросом по выбору может быть 1) углубленное изложение одного из пунктов программы, 2) вопрос или задача, непосредственно связанные с тематикой курса, однако не затронутые в нём, 3) изложение и защита результатов лабораторной работы, проделанной студентом в лабораторном практикуме в качестве дополнительной работы. На ответ по «вопросу по выбору» студенту предоставляется не более 10 минут.

На подготовку к ответу по билету студенту даётся от 30 до 45 минут. В течение экзамена студенту не разрешается пользоваться вычислительной техникой, литературой, за-



ранее подготовленными собственными записями и другими материалами, относящимися к предмету, кроме экзаменационной программы курса.

В процессе ответа на «вопрос по выбору» разрешается пользоваться заранее подготовленным планом ответа и заранее подготовленными иллюстрациями/графиками, представленными в бумажном виде, либо на электронном носителе (планшет/ноутбук). Используемые графики или иллюстрации не должны содержать частей текста доклада. На подготовку ответа на «вопрос по выбору» (повторение) даётся не более 5 минут.

В процессе ответа по билету экзаменатор может задавать уточняющие вопросы. После ответа по билету экзаменатор вправе задавать студенту любые дополнительные вопросы по программе курса.

В совокупности опрос обучающегося на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов (без учета времени на подготовку).

Примеры простых задач, решение которых необходимо для получения удовлетворительной оценки:

- Найти внутреннюю энергию идеального газа с постоянной теплоёмкостью  $CV$ , имеющего давление  $P$  и объём  $V$ .
- Выразить давление идеального газа через концентрацию и среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул.
- Записать первое начало термодинамики в дифференциальном виде.
- Рассчитать работу идеального газа в изотермическом/адиабатическом процессе.
- Вывести уравнение адиабаты идеального газа.
- Получить разность  $CP - CV$  для идеального газа.
- Адиабатическое истечение газов. Скорость звука
- Найти скорость истечения идеального одноатомного газа при температуре  $T$  в пустоту через отверстие.
- Рассчитать скорость звука в воздухе при комнатной температуре.
- Изобразить цикл Карно в координатах  $TS$ . Указать на графике теплоты нагревателя и холодильника, а также работу в цикле.
- Получить выражение для КПД идеальной тепловой машины Карно.
- Системе сообщили тепло  $Q$  при температуре  $T$ . Чему может быть равно изменение энтропии  $dS$ ?
- Дать статистическое определение энтропии. Чем определяется равновесное состояние?
- Найти изменение энтропии моля идеального газа при переходе между двумя состояниями с заданными  $T$  и  $V$  (или  $T$  и  $P$ ).
- Два твёрдых тела с известными теплоёмкостями, имеющих различные температуры, привели в тепловой контакт. Найти изменение энтропии системы к моменту установления равновесия.
- Найти изменение энтропии идеального газа при неравновесном расширении в пустоту в теплоизолированной оболочке.
- Написать дифференциал внутренней энергии/энтальпии/свободной энергии/термодинамического потенциала Гиббса.
- Получить выражение для энтальпии идеального газа с постоянной теплоёмкостью  $Cp$ .
- В процессе при постоянном давлении к системе подвели теплоту  $Q$ . Найти изменение энтальпии системы.
- В изотермическом процессе над системой совершена работа  $A$ . Найти изменение свободной энергии системы.
- Чему равно давление насыщенных паров воды при температуре  $100^\circ\text{C}$ ?
- Получить зависимость давления насыщенных паров воды от температуры.

- Изобразить фазовую диаграмму воды.
- Написать уравнение Ван-дер-Ваальса и указать физический смысл входящих в него констант.
- В координатах  $PV$  изобразить схематично семейство изотерм газа Ван-дер-Ваальса и соответствующих изотерм реального газа.
- Найти изменение температуры газа Ван-дер-Ваальса при неравновесном расширении в пустоту в теплоизолированной оболочке.
- Найти изменение температуры идеального газа в эффекте Джоуля—Томсона.
- Найти давление внутри мыльного пузыря.
- Найти высоту подъёма воды в капилляре с известным углом смачивания.
- Выразить свободную энергию поверхности жидкости через коэффициент поверхностного натяжения.
- Написать (с точностью до нормировочной константы) и схематично изобразить на графике распределение Максвелла по проекциям скорости на ось  $x$ .
- Написать (с точностью до нормировочной константы) и схематично изобразить на графике распределение Максвелла по модулям скоростей.
- Написать выражения для среднеквадратичной и наиболее вероятной скоростей молекул.
- Найти количество частиц, ударяющихся в секунду о площадку площади  $S$  в газе с температурой  $T$  и давлением  $P$ .
- Вывести барометрическую формулу для изотермической атмосферы.
- Энергия атома в возбуждённом состоянии на  $E$  больше, чем в основном. Найти долю возбуждённых атомов в системе при температуре  $T$ . Другие уровни энергии не учитывать.
- Сформулировать теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Какая энергия приходится на одну полностью возбужденную колебательную степень свободы молекулы?
- Построить схематично график зависимости молярной теплоёмкости  $CV$  двухатомного газа (азота) от температуры.
- Среднее число частиц идеального газа в некотором мысленно выделенном объёме равно  $N$ . Оценить среднеквадратичную флуктуацию числа частиц в нём.
- Найти среднеквадратичное отклонение груза на пружине жёсткостью  $\_$  от положения равновесия при температуре  $T$ .
- Получить оценочную формулу для длины свободного пробега молекул в газе твердых шариков.
- Дать определение плотности потока частиц (тепла, импульса) и коэффициента диффузии (теплопроводности, вязкости).
- Написать оценку коэффициента диффузии/теплопроводности/вязкости в идеальном газе с известными параметрами.
- Как коэффициент теплопроводности газа в некотором сосуде зависит от давления (в том числе при высоком вакууме)?
- Написать условие равновесия между двумя сосудами с идеальными газами, соединенными тонкой трубкой, если радиус трубки много меньше длины свободного пробега (эффект Кнудсена).
- Коэффициент диффузии частиц равен  $D$ . Оценить среднеквадратичное смещение частицы в пространстве от исходного положения за время  $t$ .
- Дать определение подвижности частицы и написать связь подвижности броуновской частицы с коэффициентом диффузии.

БИЛЕТ № 01

1. Вопрос по выбору.
2. Идеальный газ. Связь давления и температуры идеального газа с кинетической энергией его молекул. Уравнение состояния идеального газа. Идеально-газовое определение температуры.

БИЛЕТ № 02

1. Вопрос по выбору.
2. Работа, внутренняя энергия, теплота. Первое начало термодинамики. Теплоёмкость. Теплоёмкости  $C_V$  и  $C_P$  и связь между ними для идеального газа (соотношение Майера). Внутренняя энергия и энтальпия идеального газа.

БИЛЕТ № 03

1. Вопрос по выбору.
2. Политропический и адиабатический процессы. Уравнение адиабаты и политропы идеального газа. Скорость звука в газах.