


МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
теоретической физики

*наименование кафедры, отвечающей за реализацию дисциплины*

 (Фролов М.В.)  
*подпись, расшифровка подписи*

16.06.2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Б1.О.18 Статистическая физика**

**1. Код и наименование специальности:**

14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

**2. Специализация:**

Проектирование и эксплуатация атомных станций

**3. Квалификация выпускника:** инженер – физик

**4. Форма обучения:** очная

**5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:**

теоретической физики

**6. Составители программы:**

к.ф.-м.н., доцент Крыловецкая Татьяна Алексеевна

**7. Рекомендована:**

Научно – методическим советом физического факультета, протокол №6 от 14.06.2022 г.

**8. Учебный год:** 2024 - 2025

**Семестр(ы):** 4

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины

Цель – сформировать у студентов знания об основных идеях и математических методах термодинамики и статистической физики, а также выработать навык использования этих методов для решения конкретных задач.

Задачи курса: познакомить студентов с основными моделями макроскопических систем, используемых в рамках термодинамики и статистической физики, продемонстрировать действие физических законов, а также показать эффективность методов термодинамического и статистического описания равновесных и неравновесных процессов в макроскопических системах на примерах различных моделей.

**10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:** является дисциплиной базовой части. Для освоения курса необходимо использовать материал всех математических дисциплин базовой части «Математика», а также дисциплин базовой части «Физика».

**11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:**

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ОПК-1	Способность использовать базовые знания естественных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	ОПК-1.2  ОПК-1.5  ОПК-1.7	Знает основные понятия и законы механики жидкости и газа, теплообмена; уравнений неразрывности, движения, сохранения энергии применительно к потокам; основные законы технической термодинамики Оценивает численные значения величин, характерных для различных разделов естествознания Строит математические модели для простейших систем и процессов в естествознании и технике	Знать: основные положения и методы термодинамики и статистической физики;  Уметь: использовать в профессиональной деятельности знания о свойствах микро- и макросистем, а также методах их исследования, применять полученные знания для освоения профильных дисциплин и решения профессиональных задач;  Владеть: современным аппаратом теоретической и математической физики, необходимым для решения задач термодинамики и статистической физики.

**12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час.** – 4/144.

**Форма промежуточной аттестации:** зачет с оценкой

**Трудоемкость по видам учебной работы**

Вид учебной работы	Трудоемкость			
	Всего	По семестрам		
		4 семестр	№ семестра	...
Аудиторные занятия	50	50		
в том числе:	лекции	34	34	
	практические	16	16	
	лабораторные			
Самостоятельная работа	58	58		
в том числе: курсовая работа (проект)				
Форма промежуточной аттестации (Зачет с оценкой – час.)	Зачет с оценкой - 36	Зачет с оценкой - 36		
<b>Итого:</b>	144	144		

**13.1. Содержание дисциплины**

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК*
<b>1. Лекции</b>			
1.1	Введение	Термодинамика и статистическая физика как теория макроскопических систем. Макроскопическое и микроскопическое описание физических систем. Два способа описания макросистем. Соотношение между термодинамикой и статистической физикой.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
1.2	Основные понятия и законы термодинамики	Постулаты термодинамики. Термодинамические системы.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
1.3	Методы и приложения термодинамики	Методы термодинамики (метод круговых процессов, метод термодинамических потенциалов). Общие условия равновесия и устойчивости термодинамических систем. Термодинамические неравенства. Механическое и статистическое описание макросистем. Фазовое пространство. Теорема Лиувилля. Эргодическая проблема. Микроканоническое распределение. Каноническое распределение Гиббса. Свойства параметров канонического распределения.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
1.4	Основные представления статистической физики	Связь энтропии с вероятностью. Вероятностный смысл второго начала термодинамики. Функция распределения для энергии. Связь канонического и микроканонического распределений. Идеальный изотермический газ. Парадокс Гиббса.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
1.5	Классическая статистическая физика равновесных систем	Теорема о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы и теорема о вириале. Классическая теория теплоемкости твердого тела. Одночастичные распределения. Распределение Максвелла-Больцмана для идеального газа. Уравнение Ван-дер-Ваальса.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
1.6	Квантовая статистическая физика	Квантовое каноническое и большое каноническое распределения. Квантовая теория теплоемкости твердых тел. Квантовые распределения для идеальных газов. Распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Условие вырождения идеальных газов. Уравнение состо-	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>

		яния квантовых газов. Слабое вырождение бозе- и ферми-газов. Сильновырожденный бозе-газ. Бозе-Эйнштейновская конденсация. Применение статистики Бозе-Эйнштейна к тепловому равновесному излучению. Вырожденный электронный газ. Электронная теплоемкость металлов.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
1.7	Основы кинетики неравновесных процессов	Основы теории неравновесных процессов. Элементы физической кинетики. Кинетическое уравнение Больцмана в приближении релаксации.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
<b>2. Практические занятия</b>			
2.1	Основные понятия термодинамики	Постулаты термодинамики. Первое и второе начала термодинамики. Метод термодинамических потенциалов. Свободная энергия. Термодинамика диэлектриков и магнетиков. Термодинамика систем с переменным числом частиц. Теория фазовых переходов первого и второго рода.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
2.2	Основные представления статистической физики	Фазовое пространство. Теорема Лиувилля. Эргодическая гипотеза.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
2.3	Классическая статистическая физика равновесных систем	Микроканоническое распределение. Связь энтропии и вероятности. Каноническое распределение. Идеальный газ. Распределение Максвелла и Больцмана. Большое каноническое распределение. Классическая теория теплоемкости твердых тел	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
2.4	Статистическая теория идеальных систем	Решение типовых задач на расчет статистических характеристик идеального газа	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
2.5	Статистическая физика квантовых систем	Квантовое каноническое распределение. Распределение Ферми-Дирака. Температура вырождения. Вырожденный электронный газ. Электронная теплоемкость металлов. Распределение Бозе-Эйнштейна. Явление бозе-конденсации. Равновесное тепловое излучение. Формула Планка.	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>
2.6	Неравновесная термодинамика. Физическая кинетика	Решение типовых задач на расчет кинетических коэффициентов	<a href="https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188">https://edu.vsu.ru/enrol/index.php?id=29188</a>

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Введение	2				2
2	Основные понятия и законы термодинамики	2	2		4	8
3	Методы и приложения термодинамики	4	2		10	16
4	Основные представления статистической физики	4	2		6	12

5	Классическая статистическая физика равновесных систем	8	4	14	26
6	Квантовая статистическая физика	10	4	14	28
7	Основы кинетики неравновесных процессов	4	2	10	16
	Промежуточная аттестация				36
	<b>Итого:</b>	34	16	58	144

#### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

При освоении лекционного материала обучающимся необходимо понимать связь каждой лекции с предыдущими, ее место и роль в текущей главе; на занятиях рекомендуется задавать уточняющие вопросы преподавателю, домашние задания следует систематически выполнять.

#### 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Ансельм, А. И. Основы статистической физики и термодинамики : учебное пособие / А. И. Ансельм. — 2-е изд. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 448 с. — ISBN 978-5- 8114-0756-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/210215">https://e.lanbook.com/book/210215</a> (дата обращения: 28.09.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей
2	Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учебное пособие : в 10 томах / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под редакцией Л. П. Питаевского. — 6-е изд., стереот. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2021 — Том 5 : Статистическая физика. В 2 ч. Ч. 1 — 2021. — 620 с. — ISBN 978-5-9221-1510-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/185665">https://e.lanbook.com/book/185665</a> (дата обращения: 28.09.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
1	Термодинамика и классическая статистическая физика : учебное пособие для вузов / А.Н. Ал- малиев, И.В. Копытин, С.И. Мармо, Т.А. Чуракова .— Воронеж : Издательский дом ВГУ. — 2015.— 71 с.
2	Квантовая и неравновесная статистика / А.Н. Алмалиев, И.В. Копытин, С.И. Мармо, Т.А. Чуракова .— Воронеж : ИПЦ ВГУ. — 2010. — 47 с.
3	Лекции по термодинамике, статистической физике и физической кинетике : учебное пособие. Ч. 1. Термодинамика и классическая статистическая физика / А. Н. Алмалиев, С. И. Мармо, Т.С. Саранцева .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2019 .— 104 с.
4	Лекции по термодинамике, статистической физике и физической кинетике : учебное пособие. Ч. 2. Квантовая статистика, флуктуации, основы теории неравновесных процессов / А. Н. Алмалиев, С. И. Мармо, Т. С. Саранцева .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2020 .— 107 с.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)\*:

№ п/п	Ресурс
3	<a href="https://lib.vsu.ru/">https://lib.vsu.ru/</a>

#### 16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

1. Организация самостоятельной работы студентов : методические рекомендации для преподавателей вузов / Ю.А. Гончарова ; Воронеж. гос. ун-т. — Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2007 .— 28 с., табл. — Библиогр.: с. 26-28 .— <URL:<http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m07-202.pdf>>.

## 17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ, электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

Дисциплина реализуется с применением ДОТ <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29188>

## 18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, практического типа, текущего контроля и промежуточной аттестации

Специализированная мебель

Компьютерный класс, аудитория для групповых и индивидуальных консультаций, помещение для самостоятельной работы

Специализированная мебель, компьютеры с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета

Microsoft Windows 10, LibreOffice, Adobe Reader

## 19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Разделы 1.1 - 1.7, 2.1 - 2.6	ОПК-1	ОПК-1.2, ОПК-1.5, ОПК-1.7	контрольная работа 1, контрольная работа 2. Тестирование по заданиям с открытым и закрытым ответом по п. 21 ФОС
Промежуточная аттестация форма контроля - зачет с оценкой				Список вопросов к зачету

## 20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

### 20.1. Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств: контрольная работа 1, контрольная работа 2.

#### Пример варианта контрольной работы 1.

1. Найти величину статистического веса для изолированной системы  $N$  невзаимодействующих линейных гармонических осцилляторов, помещенных в однородное электрическое поле напряженности  $\varepsilon$  (частота осциллятора  $\omega$ , заряд  $e$ , масса  $m$ ).
2. Найти внутреннюю энергию и уравнение состояния для идеального изотермического газа из  $N$  молекул в объеме  $V$ , молекулы которого имеют энергию, пропорциональную модулю импульса:  $\epsilon_i = c|p_i|$ .
3. Идеальный одноатомный газ, состоящий из  $N$  частиц массой  $m$ , заключен в бесконечно высокий цилиндр и помещен в однородное гравитационное поле. Система находится в состоянии термодинамического равновесия при температуре  $T$ . Вычислить свободную энергию системы  $F$  и теплоемкость  $c_v$ .
4. Имеется идеальный газ, состоящий из  $N$  одноатомных молекул, находящихся при температуре  $T$ . Вычислить наивероятнейшее значение полной энергии системы.

#### Пример варианта контрольной работы 2.

1. Найти давление электронного газа при условии  $kT \ll \mu$ .
2. Для ультрарелятивистского электронного газа найдите связь между давлением и полной энергией при температуре  $T = 0$  К.
3. Найдите число фотонов равновесного излучения в единице объема с длиной волны в интервале  $\lambda, \lambda + d\lambda$ .
4. Найти отношение числа частиц бозе-газа  $N_1$ , находящихся в бозе-конденсате, к полному числу частиц  $N$  при температуре  $T < T_0$  ( $T_0$  - температура бозе-конденсации).

#### Описание технологии проведения

На решение заданий контрольный работы выделяется 2 академических часа. При решении задач студент может пользоваться заранее подготовленными методическими материалами.

Требования к выполнению заданий (или шкалы и критерии оценивания)

Оценка **«отлично»**: *Подробные и безошибочные решения всех задач, допускаются незначительные вычислительные неточности.*

Оценка **«хорошо»**: *Подробные решения всех задач, выбор правильного хода решения для всех задач. Допускаются вычислительные неточности, а также неполное выполнение отдельных заданий.*

Оценка **«удовлетворительно»**: *решение отдельных задач, допускаются незначительные неточности в выборе метода и хода решения задачи.*

Оценка **«неудовлетворительно»**: *отсутствие правильно решенных задач, использование ошибочных методов и приемов для решения поставленных задач.*

## 20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Список вопросов для проведения экзамена  
(наименование оценочного средства промежуточной аттестации)

1. Постулаты термодинамики (термодинамические системы, состояние термодинамического равновесия, постулат аддитивности, температура, 3 начала термодинамики).
2. Метод термодинамических потенциалов (внутренняя энергия, свободная энергия) энтальпия, энергия Гиббса как термодинамические потенциалы).
3. Условия равновесия и устойчивости систем (изолированная система, система с постоянным объемом в термостате, система при постоянном давлении в термостате).
4. Микроканоническое распределение (геометрический смысл нормировочного множителя, вывод основного термодинамического тождества из микроканонического распределения, расчет термодинамических величин, идеальный изолированный газ).
5. Каноническое распределение Гиббса (вывод канонического распределения из микроканонического) свойства параметров канонического распределения, расчет термодинамических величин).
6. Функция распределения для энергии (распределение по энергии в изолированной и изотермической системах, связь канонического и микроканонического распределений).
7. Энтропия и её связь с вероятностью состояния. Статистический смысл второго начала термодинамики (термодинамическая вероятность, принцип Больцмана).
8. Идеальный изотермический газ. Парадокс Гиббса.
9. Реальный газ. Уравнение Ван-дер-Ваальса (вириальное разложение, энергия взаимодействия молекул, смысл поправок в уравнении Ван-дер-Ваальса).
10. Теорема о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы. Теорема о вириале (примеры применения: одноатомный и двухатомный идеальный газ, система гармонических осцилляторов).

11. Классическая теория теплоемкости твердых тел (приближение малых колебаний, закон Дюлонга–Пти, отклонение расчетной температурной зависимости теплоемкости от экспериментальной).
12. Одночастичные распределения (распределение Максвелла по проекциям и абсолютным значениям скорости, распределение Больцмана).
13. Термодинамика систем с переменным числом частиц (химический потенциал, связь с потенциалом Гиббса, производные химпотенциала по давлению и температуре, большой термодинамический потенциал).
14. Статистическое описание систем с переменным числом частиц (большое каноническое распределение, расчет макропараметров и среднего значения числа частиц, идеальный газ с переменным числом частиц).
15. Фазовое равновесие. Фазовые переходы первого рода (условие равновесия фаз в однокомпонентной двухфазной системе, дифференциальное уравнение кривой фазового равновесия — уравнение Клапейрона–Клаузиуса, равновесие трех фаз, тройная точка).
16. Фазовые переходы второго рода (скачки теплоемкости) сжимаемости и коэффициента теплового расширения) связь между ними) дифференциальное уравнение кривой фазового перехода - уравнение Эренфеста).
17. Квантовые каноническое и большое каноническое распределения (вероятность нахождения системы в стационарном состоянии и в состоянии с данной энергией, смысл параметров квантового канонического распределения, расчет термодинамических характеристик системы).
18. Переход к непрерывному спектру энергий при статистическом описании квантовых систем (фазовый объем, приходящийся на одно квантовое состояние, расчет энергетической плотности состояний).
19. Квантовый осциллятор (расчет средней энергии осциллятора, области высокой и низкой температуры, теория Эйнштейна теплоемкости твердых тел).
20. Квантовая теория теплоемкости Дебая (распределение осцилляторов по частотам в модели Дебая, расчет средней энергии кристалла, поведение теплоемкости при высоких и низких температурах).
21. Квантовые распределения для идеальных газов (тождественность частиц, одночастичное описание идеальных систем, числа заполнения).
22. Распределения Бозе–Эйнштейна и Ферми–Дирака (средние значения чисел заполнения в системах бозонов и фермионов, расчет средней энергии, условие нормировки).
23. Температура вырождения и переход к классической статистике (условие перехода квантовых распределений в классическое, его интерпретация, оценка температуры вырождения для воздуха при нормальных условиях и электронного газа в металле).
24. Уравнение состояния квантовых идеальных газов (расчет большого термодинамического потенциала и вывод уравнения состояния).
25. Сильновырожденный бозе-газ. Бозе-эйнштейновская конденсация (поведение химпотенциала при понижении температуры, явление бозе-конденсации, температурная зависимость энергии и давления в условиях бозе-конденсации).
26. Электронный газ в металле при нулевой температуре (энергия Ферми, средняя энергия и давление в полностью вырожденном электронном газе, распределение Ферми-Дирака при нулевой температуре).
27. Основы теории неравновесных процессов (феноменологический и микроскопический подходы). Кинетическое уравнение Больцмана (уравнение на одночастичную функцию распределения в разреженном газе при учете парных столкновений).
28. Кинетическое уравнение в релаксационном приближении (замена нелинейного столкновительного члена на линейный релаксационный).
29. Применение кинетического уравнения Больцмана в релаксационном приближении к описанию электропроводности электронного газа (расчет коэффициента электропроводности, закон Видемана — Франца).

Список задач для экзамена.



1. Найти фазовый объем, ограниченный гиперповерхностью энергии  $H(q,p) = E$ , и плотность состояний (статистический вес) для адиабатически изолированного идеального газа из  $N$  одноатомных молекул с энергией  $E$  в объеме  $V$ .
2. Для  $N$  невзаимодействующих линейных гармонических осцилляторов с энергией  $E$  справедливо микроканоническое распределение. Вычислить для этой системы фазовый объем  $\Gamma$ , энтропию  $S$  и температуру  $T$ .
3. Найти уравнение состояния и теплоемкость для классического ультрарелятивистского газа с законом дисперсии  $\varepsilon = cp$ , где  $c$  — скорость света. Газ находится при постоянной температуре  $T$ .
4. Для изотермического одноатомного идеального газа из  $N$  молекул, заключенного в объеме  $V$ , вычислить внутреннюю энергию, теплоемкость  $C_V$  и получить уравнение состояния.
5. Найти среднее значение обратной величины скорости молекулы в газе. Газ поддерживается при постоянной температуре  $T$ . Масса одной молекулы  $m$ .
6. Найти центр тяжести бесконечного столба идеального газа в однородном поле тяжести, если ускорение свободного падения  $g$ , масса молекулы  $m$ , температура  $T$ .
7. В классическом ультрарелятивистском идеальном газе найти средние и наиболее вероятные значения импульса и энергии частицы. Температура газа  $T$ . В ультрарелятивистском диапазоне энергия связана с импульсом (закон дисперсии) соотношением  $\varepsilon = cp$ .
8. Исходя из распределения Максвелла-Больцмана, найти внутреннюю энергию и теплоемкость в расчете на одну молекулу бесконечного столба идеального газа, находящегося в гравитационном поле. Температуру газа  $T$  считать известной. Масса молекул  $m$ , ускорение свободного падения  $g$ .
9. Система имеет невырожденный спектр  $E_n = n\varepsilon$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, p-1$ ).  
Определить среднюю энергию такой системы и исследовать её поведение в зависимости от температуры.
10. Найти свободную энергию и энтропию для изотермической системы из  $N$  независимых линейных квантовых осцилляторов. Частота осцилляторов —  $\omega$ , температура —  $T$ .
11. Для случая низких температур вычислить сумму состояний, среднюю энергию и теплоемкость для системы  $N$  квантовых плоских ротаторов. Оператор Гамильтона для плоского ротатора с моментом инерции  $I$ .
12. Система состоит из  $N$  неподвижных частиц с внутренними степенями свободы. Энергия каждой частицы может принимать только два значения:  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$ . Кратности вырождения энергетических уровней равны 1 (*спектр не вырожден*). Температура системы  $T$ . Найти внутреннюю энергию и теплоемкость системы. Исследовать поведение теплоемкости как функцию температуры.
13. Для случая низких температур вычислить статистическую сумму, внутреннюю энергию и теплоемкость для системы частиц в бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $a$ . Масса частицы  $m$ .
14. Найти граничную и среднюю энергии идеального электронного газа в металле при температуре  $T = 0$  К. Объем системы  $V$ .
15. Для ультрарелятивистского электронного газа в металле найдите полную и среднюю энергию одной частицы при температуре  $T = 0$  К.
16. Определить долю свободных электронов в металле при температуре  $T = 0$  К, кинетическая энергия которых больше половины максимальной.
17. Определить число состояний  $g(\varepsilon)d\varepsilon$ , граничный импульс  $p_0$  и энергию Ферми  $\mu_0$  при абсолютном нуле температуры для ультрарелятивистского электронного газа из  $N$  частиц в объеме  $V$ . Энергия частицы связана с импульсом  $p$  соотношением  $\varepsilon = cp$ , где  $c$  — скорость света.
18. Найти отношение числа частиц бозе-газа  $N_b$ , находящихся в бозе-конденсате, к полному числу частиц  $N$  при температуре  $T < T_0$  ( $T_0$  — температура бозе-конденсации).
19. Для вырожденного бозе-газа, находящегося при температуре  $T < T_c$  ( $T_c$  — температура бозе-конденсации), вычислить температурные зависимости большого термодинамического потенциала  $\Omega$ , энергии  $E$ , давления  $P$ , теплоемкости  $C_V$  и энтропии  $S$ .
20. Рассчитать стационарную функцию распределения  $f$  для электронов проводимости во внешнем однородном электрическом поле  $E$ . Концентрацию электронов считать постоянной, а равно-весное распределение  $f_0$  — максвелловским.

Описание технологии проведения

Экзамен проходит в устной форме. Студенту предлагается 2 вопроса из полного списка вопросов, на которые он должен дать развернутый ответ в течение одного академического часа. В случае, если студент имеет оценку «неудовлетворительно» по одной из контрольных работ текущей аттестации, ему также предлагается одна из задачи из соответствующей контрольной работы.

Требования к выполнению заданий, шкалы и критерии оценивания

**«Отлично»:** Подробные и безошибочные ответы на основные и дополнительные вопросы, полное понимание и свободное владение материалом, умение решать практические задачи

**«Хорошо»:** Подробные ответы на поставленные вопросы с мелкими ошибками, незначительные пробелы в знании материала, умение решать практические задачи

**«Удовлетворительно»:** Неудовлетворительные ответы на один из основных вопросов КИМа и некоторые дополнительные вопросы, неполное знание или понимание материала, низкие навыки решения практических задач

**«Неудовлетворительно»:** плохое знание материала, неудовлетворительные ответы на вопросы КИМа и большинство дополнительных вопросов, отсутствие навыков решения практических задач

**Тесты**

1. Какие из термодинамических величин (объем, температура, химический потенциал, давление, энтропия) являются интенсивными?

*Ответ:* **а)** температура и давление, **б)** объем и давление, **в)** энтропия и температура.

2. Чему равна полная энергия классической системы  $N$  невзаимодействующих линейных гармонических осцилляторов, находящихся при температуре  $T$ ?

*Ответ:* **а)**  $E = 3/2 NkT$ , **б)**  $E = 1/2 NkT$ , **в)**  $E = NkT$ .

3. В каких пределах изменяется среднее число частиц с полуцелым спином в одном квантовом состоянии с заданной энергией?

*Ответ:* **а)**  $[0, 1]$ , **б)**  $[1, \infty)$ , **в)**  $[0, \infty)$ .

4. Какими основными свойствами обладает химический потенциал  $\mu$  квантовой системы частиц с целым спином?

*Ответ:* **а)**  $\mu > 0, \partial\mu/\partial T < 0$ ; **б)**  $\mu > 0, \partial\mu/\partial T > 0$ ; **в)**  $\mu < 0, \partial\mu/\partial T < 0$ .

5. Как зависит от температуры энергия  $E$ , излучаемая в равновесных условиях абсолютно чёрным телом? (Закон Стефана-Больцмана).

*Ответ:* **а)**  $E \sim T^2$ , **б)**  $E \sim T^3$ , **в)**  $E \sim T^4$ .

6. Как зависит от числа частиц системы  $N$  относительная флуктуация энергии  $\delta E$  в классической изотермической системе?

*Ответ:* **а)**  $\sqrt{N}$ , **б)**  $1/\sqrt{N}$ , **в)**  $N^2$ .

7. Какими основными свойствами обладает химический потенциал  $\mu$  квантовой системы частиц с целым спином?

*Ответ:*  $\mu < 0$ ;  $\frac{\partial\mu}{\partial T} < 0$ .

8. Как, зная функцию Гамильтона изолированной системы  $H(q, p, a)$ , вычислить ее энтропию?

9. Запишите общий вид микроканонического распределения Гиббса.
10. Запишите выражение для интеграла состояния классической изотермической системы.
11. С точностью до константы запишите распределение Максвелла по модулю скорости.
12. Запишите в общем виде выражение для большого термодинамического потенциала  $\Omega$  изотермической системы с переменным числом частиц.
13. Запишите для общего случая нормированное распределение Больцмана.
14. Запишите уравнение Клапейрона – Клаузиуса.
15. Запишите распределение Бозе – Эйнштейна. Какие значения может принимать среднее число частиц в некотором энергетическом состоянии?

### Задачи

1. Сформулируйте первое начало термодинамики.  
*Ответ:*  $\delta Q = dE + \delta W$ .  $E$  – внутренняя энергия системы,  $Q$  – количество тепла, сообщенное системе,  $W$  – работа системы.
2. Сформулируйте третье начало термодинамики.  
*Ответ:* При стремлении температуры к нулю энтропия системы стремится к постоянному пределу, не зависящему от ее начального состояния.
3. Какой смысл имеет поправка  $a$  в уравнении Ван-дер-Ваальса  $(p + a/V^2)(V - b) = NkT$ ?  
*Ответ:* Поправка  $a$  обусловлена взаимодействием молекул газа.
4. Сформулируйте теорему о равномерном распределении средней кинетической энергии по степеням свободы и теорему о вириале.  
*Ответ:* На каждую степень свободы в среднем приходится кинетическая энергия  $kT/2$ . На каждый вириал приходится в среднем энергия  $kT/2$ .
5. Используя теорию Дебая, запишите температурную зависимость квантовой теплоемкости твердого тела при низких температурах.  
*Ответ:*  $C_V \sim T^3$ .
6. Какие величины терпят разрыв при равновесном фазовом переходе второго рода?  
*Ответ:* Скачкообразно изменяются при фазовых переходах второго рода теплоемкость  $C_p$ , сжимаемость  $\beta_T$ , температурный коэффициент расширения  $\alpha_T$ . Можно короче – вторые производные химического потенциала.
7. Чем определяется изменение свободной энергии в изотермических процессах?  
*Ответ:* работой системы ( $\delta W$ ).
8. Какие из термодинамических величин (объем, температура, химический потенциал, давление, энтропия) являются интенсивными?  
*Ответ:* температура и давление.

9. В каких пределах изменяется среднее число частиц с полуцелым спином в одном квантовом состоянии с заданной энергией?

Ответ:  $\bar{n}$  принимает значения в интервале  $[0, 1]$ .

10. Известна величина фазового объема  $\Gamma$  изолированной системы. Как найти давление?

Ответ: 
$$p = \frac{\partial \Gamma / \partial V}{\partial \Gamma / \partial E}.$$

11. Запишите уравнение Гиббса-Гельмгольца.

Ответ: 
$$E = F - T \left( \frac{\partial F}{\partial T} \right)_V.$$

Здесь  $E$  – внутренняя энергия системы,  $F$  – свободная энергия.

12. Запишите выражение для фазового объема  $\Gamma$  изолированной системы с энергией  $E$ . Функция Гамильтона системы  $H(q, p, a)$  известна.

Ответ: 
$$\Gamma = \int_{\{H(q, p, a) \leq E\}} dq dp.$$

13. Запишите большое каноническое распределение Гиббса. (Изотермическая система с переменным числом частиц).

Ответ: 
$$w(q, p, N) = \frac{1}{N!} \exp \left( \frac{\Omega + \mu N - H_N(q, p)}{kT} \right),$$

где  $\Omega$  – большой термодинамический потенциал,  $\mu$  – химический потенциал системы,  $H_N$  – функция Гамильтона системы.

14. Запишите квантовое каноническое распределение. Обозначения поясните.

Ответ: Вероятность обнаружения системы в состоянии с энергией  $E_n$

$$W_{E_n} = g_n \exp \left( \frac{F - E_n}{kT} \right),$$
 где  $g_n$  – кратность вырождение состояния с энергией  $E_n$ ,  $F$  –

свободная энергия системы.

15. Запишите основное термодинамическое тождество.

Ответ:  $TdS = dE + PdV.$