



## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФГБОУ ВО «ИГУ»

Кафедра теоретической физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета

/Н.М. Буднев

«02» апреля 2025 г.



### Рабочая программа дисциплины

Наименование дисциплины: Б1.О.14.06 Термодинамика и статистическая физика

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль) подготовки: Электроника и нанoeлектроника

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета  
Протокол №49 от «26» марта 2025 г.

Председатель

Н.М.Буднев

Рекомендовано кафедрой:

Протокол №6

От «24» марта 2025 г.

Зав. кафедрой

С.В. Ловцов

Иркутск 2025 г.

## Содержание

I. Цели и задачи дисциплины (модуля).....	3
II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП .....	3
III. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля) .....	3
IV. Содержание и структура дисциплины (модуля).....	4
4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов.....	4
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине .....	4
4.3. Содержание учебного материала .....	5
4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ .....	6
4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС) .....	7
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.....	7
4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии).....	7
V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля).....	8
а) список литературы .....	8
б) периодические издания .....	9
в) список авторских методических разработок.....	9
г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы.....	9
VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	9
VII. Образовательные технологии.....	10
VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации .....	10
Приложение: фонд оценочных средств	

## I. Цели и задачи дисциплины (модуля)

Целью дисциплины «Термодинамика и статистическая физика» является усвоение основных идей и методов равновесной термодинамики и теории равновесных квантовых и классических статистических ансамблей Гиббса и приобретение навыков их применения к конкретным физическим системам при низких и высоких температурах, а также усвоение основных физических представлений и математических идей, лежащих в основе этих методов; приобретение навыков их применения к описанию конкретных физических процессов и к вычислению экспериментально наблюдаемых характеристик равновесных систем.

Данный курс призван решать следующие задачи:

-- развитие представлений о трех важнейших ансамблях Гиббса: микроканоническом, каноническом и большом каноническом, об эквивалентности различных равновесных ансамблей, о связи между энтропией и вероятностью и о термодинамической теории флуктуаций;

-- овладение приемами предельного перехода от квантовых статистических ансамблей к классическому (больцмановское приближение) и связанных с ними различий в способах учета квантовомеханической тождественности частиц;

--- формирование умений и навыков самостоятельного расчета равновесных процессов и характеристик равновесных систем.

## II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Термодинамика и статистическая физика является обязательной для изучения дисциплиной по данному профилю. При изучении курса «Термодинамика и статистическая физика» используются знания, приобретенные при изучении всех без исключения предыдущих математических и физических курсов: «Математический анализ», «Аналитическая геометрия и линейная алгебра», «Дифференциальные и интегральные уравнения», «Теоретическая механика», «Электродинамика», «Квантовая механика».

## III. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля)

**Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций**

Компетенция	ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности
ОПК 1.1	Применяет базовые знания в области физики для решения научно-исследовательских задач
ОПК 1.2	Применяет базовые знания в области физики для решения прикладных задач профессиональной деятельности
ОПК 1.3	Представляет слушателям в доступной для восприятия форме знания в области физики, в том числе при выполнении задач в сфере педагогической деятельности

## IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Объем дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 часов, в том числе 97 часов контактной работы.

Занятия проводятся только в очной форме обучения с применением дистанционного контроля самостоятельной работы студентов через ЭИОС факультета. Электронной и дистанционной форм обучения не предусматривается.

На практическую подготовку отводится 36 ч.

Форма промежуточной аттестации: экзамен.

#### 4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов

№ п/п	Раздел дисциплины/темы	Семестр	Всего часов	Из них практическая подготовка обучающихся	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся, практическую подготовку и трудоемкость (в часах)			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля успеваемости; Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
					Контактная работа преподавателя с обучающимися				
					Лекции	Семинарские /практические /лабораторные занятия	Консультации		
1	1-12	6	144	36	36	36	1	30	Практическое задание; экзаменационные задачи
Итого:			144	36	36	36	1	30	

#### 4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

Семестр	Название раздела, темы	Самостоятельная работа обучающихся			Оценочное средство	Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы
		Вид самостоятельной работы	Сроки выполнения	Трудоемкость (час.)		
6	Тема 1-12	Задание в виде задачи	После пройденных тем	30	Демонстрация готовых решений	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ.

#### 4.3. Содержание учебного материала

##### Содержание разделов и тем дисциплины

##### Раздел 1, Термодинамика

##### **Тема 1. Начала термодинамики**

Работа и теплота. I начало термодинамики. II начало термодинамики для квазистатических процессов: формулировки Томсона, Клаузиуса, Каратеодори. Энтропия и абсолютная температура. II начало термодинамики для нестатических (необратимых) процессов. Основное уравнение и основное неравенство термодинамики. III начало термодинамики (закон Нернста).

##### **Тема 2. Термодинамические потенциалы**

Основные термодинамические потенциалы: адиабатический  $U(S, V, N)$ , свободная энергия  $F(T, V, N) = U - TS$ , энтальпия  $H(S, P, N) = U + PV$ , потенциал Гиббса  $\Phi(T, P, N) = F + PV$ , химический  $\mu(T, P)$  и большой потенциал  $J(T, V, \mu) = F - \Phi = -PV$ . Уравнение Гиббса-Дюгема. Общие условия устойчивости термодинамического равновесия, термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье-Брауна. Условия устойчивости для однородных систем. Правило фаз Гиббса. Закон действующих масс.

### **Тема 3. Фазовые переходы**

Условия равновесия для гетерогенных систем. Правило фаз Гиббса. Фазовые переходы в однокомпонентных системах. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Уравнения Эренфеста-Кеезома. Термодинамика диэлектриков и магнетиков. Фазовый переход металла из нормального в сверхпроводящее состояние.

### **Раздел 2. Статистическая физика.**

#### **Тема 4. Ансамбль в статистической механике**

Классический статистический ансамбль: фазовое пространство и функция распределения. классического ансамбля, теорема Лиувилля, уравнение Лиувилля. Основной постулат классической статистической физики в картине Гамильтона и Лиувилля. Необратимость и возвратная теорема Пуанкаре – Цермело. Квантовый ансамбль: статистический оператор (матрица плотности), уравнение фон Неймана. Основной постулат квантовой статистической физики.

#### **Тема 5. Распределения Гиббса**

Функции распределения равновесных статистических систем.

##### **Микроканоническое распределение Гиббса**

Принцип (Толмена) равных априорных вероятностей для квантовой изолированной системы. Статистический вес и энтропия системы. Квазиклассическое приближение и вычисление термодинамических величин. Вероятность и энтропия (как мера неопределенности состояния системы). Вычисление термодинамических величин.

**Каноническое распределение Гиббса для закрытой системы в термостате** Каноническая статистическая сумма (интеграл) и ее связь со свободной энергией системы. Вычисление термодинамических величин. Давление как "отклик" системы на изменение объема. Квазиклассическое приближение.

##### **Большой канонический ансамбль для открытой системы в термостате**

Статистический оператор для систем с переменным числом частиц. Вычисление термодинамических величин с помощью большого канонического распределения Гиббса. Теорема Нернста.

#### **Тема 6. Идеальные системы массивных частиц**

Идеальные системы в больцмановском приближении. Квазиклассическое приближение для поступательных степеней свободы. Уравнения состояния больцмановского газа. Распределение Максвелла—Больцмана как одночастичное распределение Гиббса. Теорема о средней энергии, приходящейся на степень свободы больцмановской системы. Внутренние степени свободы. Характеристическая температура, «замороженные» степени свободы. Вклад вращений и колебаний на примере двухатомной молекулы. Температурная зависимость теплоемкости газа многоатомных молекул. Степень ионизации газа, формула Саха. Идеальные системы бозонов и фермионов. Представление чисел заполнения. Распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Распределение Максвелла-Больцмана как предельный случай квантовой статистики. Уравнения состояния идеального квантового газа. Параметр вырождения квантовой системы  $\delta = (n / g_s)(h^2 / 2\pi mkT)^{3/2}$ , критерий применимости больцмановского приближения. Поправки к давлению больцмановского газа, обусловленные квантовой статистикой. Вырожденный бозе-газ. Конденсация Бозе-Эйнштейна. Химический потенциал и теплоемкость вырожденного бозе-газа вблизи критической точки.

#### **Тема 7. Флуктуации термодинамических величин**

Эквивалентность равновесных ансамблей. Флуктуации термодинамических величин: энергии и числа частиц. Флуктуации чисел заполнения в ферми- и бозе-системах. Термодинамическая теория флуктуаций.

#### **Тема 8. Излучение абсолютно черного тела**

Закон Планка для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела. Уравнения состояния фотонного газа. Два классических предела закона Планка.

#### **Тема 9. Теория теплоемкости твердого тела**

Решеточная теплоемкость твердого тела. Акустические и оптические ветви колебаний решетки. Фононы. Теория Эйнштейна и теория Дебая теплоемкости твердого тела. Концепция квазичастиц.

#### **Тема 10. Свойства вырожденного и невырожденного ферми-газа**

Ферми-газ при  $T=0\text{K}$ , уровень Ферми, температура Ферми. Электронная теплоемкость металлов при  $T \ll T_F$ . Электроны в чистом полупроводнике.

#### **Тема 11. Магнетизм**

Магнитные свойства электронного газа: парамагнетизм Паули и диамагнетизм Ландау. Локализованные спины. Ферромагнетизм и "молекулярное" поле Вейсса. Обменное взаимодействие Гейзенберга. Домены. Температура Кюри.

#### **Тема 12. Неидеальный классический газ**

Конфигурационная статистическая сумма. Теорема вириала в статистической механике. Приближенный учет парного взаимодействия молекул газа. Уравнение состояния слабонеидеального газа. Вириальное разложение.

### **4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ**

Раздел 1, Темы 1--3: (см. [http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/seminar\\_t.pdf](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/seminar_t.pdf))

- 1) Первое начало термодинамики (для реального процесса), работа, теплота, политропические процессы.  $T, P, \rho$ , в различных моделях атмосферы. (2ч)
- 2) Второе начало (для виртуального обратимого процесса и/или равновесного состояния) и его следствия. Энтропия и ее вычисление, к.п.д. тепловых машин, Метод якобианов. (2ч)
- 3) Неравновесные процессы, Гей-Люс. Дж.-Томп. Термодинамические потенциалы  $U, H$ . Теорема Нернста. (2ч)
- 4) Потенциалы Гельмгольца и Гиббса. Излучение. Фазовые переходы. Поверхность раздела. (2ч)
- 5) Диэлектрики. Магнетики. Стержни. Ленты. Химические реакции, растворы. (2ч)

Раздел 2, Темы 4—12: (см. [http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/prakt\\_sp.pdf](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/prakt_sp.pdf))

- 6) Распределения вероятностей. Условная вероятность. Распределения Пуассона и Гаусса. Моменты распределений. Характеристическая функция. (2ч)
- 7) Микроканоническое распределение. Фазовый объем: классический идеальный газ осциллятор. Статистический вес неравновесного состояния системы спинов  $1/2$ , как равновесного во внешнем магнитном поле для ансамбля двухуровневой системы. (2ч)
- 8) Каноническое распределение Гиббса. Статистическая сумма. Осцилляторы. Двухуровневая система с вырождением. Вероятность макросостояния идеального газа с температурой  $T$ . (2ч)
- 9) Системы с переменным числом частиц. Большое распределение Гиббса. (2ч)
- 10) Распределение Максвелла в  $d$ -мерии. Среднее число столкновений, длина пробега. Классическая формула Ричардсона. (2ч)
- 11) Распределения Больцмана. Системы во внешнем поле. (2ч)
- 12) Распределения Больцмана. Теоремы о равнораспределении и вириале. (2ч)
- 13) Распределения Больцмана. Классические и квантовые магнитные моменты в магнитном поле. Функции Ланжевена и Бриллюэна. Восприимчивость и теплоемкость. Классический предел. Одномерная модель Изинга. (2ч)
- 14) Термодинамика идеальных Ферми- и Бозе-газов в  $d$ -мерии,  $\varepsilon(p) = ap^l$ . Бозе-конденсация, теплоемкость Дебая, химпотенциал Ферми-газа в  $d=2$ . Квантовая формула Ричардсона. (2ч)
- 15) Распределения Ферми из принципа Паули и гипотезы молекулярного хаоса. Излучение черного тела. Формула Планка в среде. (2ч)
- 16) Релятивистский вырожденный электронный газ, равновесие нейтронной звезды. Флуктуации термодинамических величин. Энтропия как функция чисел заполнения. Собственные полупроводники. (4ч)

17) Ионизация как термализация. Статистический вес и энтропия неравновесных квантовых газов с группами  $Gk \gg 1$  (почти) вырожденных состояний с энергией  $E_k$  и их неравновесные и равновесные числа заполнения. Разность магнитных восприимчивостей при фиксированных  $\mu$  и  $N$ . Зависимость химпотенциала  $\mu$  от магнитного поля, полная намагниченность и функция Ланжевена магнетика в больцмановском приближении. (4ч).

#### 4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС)

№ нед.	Раздел	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
	Термодинамика <u>Темы 1-3</u>	Внеаудиторное решение задач	Дом. Зад. и <b>Задание 1</b> <a href="http://www.pd.i-su.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/job_1.pdf">http://www.pd.i-su.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/job_1.pdf</a>	Основная и дополнительная	15
	Статистическая физика <u>Темы 4--12</u>	Внеаудиторное решение задач	Дом. Зад. и <b>Задание 2</b> <a href="http://www.pd.i-su.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/job_2.pdf">http://www.pd.i-su.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/job_2.pdf</a>	Основная и дополнительная	15

#### 4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

*Раздел 1, Темы 1--3:* Своевременное решение домашних заданий указанных в планах. *Раздел 2, Темы 4—12:* Своевременное решение домашних заданий указанных в планах. Своевременное выполнение и сдача двух семестровых заданий.

#### 4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)

Курсовые не предусмотрены.

## V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

### а) Основная литература

1. Ансельм, Андрей Иванович. Основы статистической физики и термодинамики [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. И. Ансельм. - Москва : Лань, 1973, 2007. - 423, [3] с. : ил. - (Учебники для вузов : специальная литература) (Классическая учебная литература по физике) (Лучшие классические учебники). - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ.

2. Коткин, Глеб Леонидович. Лекции по статистической физике. учеб. пособие / Г.Л. Коткин. - Москва – Ижевск, : R&C Dynamics, 2006. 190 с. (20 экз)

3. **Коренблит, Сергей Эммануилович.** Конспект лекций по статистической физике [Текст] : учеб. пособие / С. Э. **Коренблит**, С. И. Синеговский ; Фед. агентство по образованию; Иркут. гос. ун-т. - Иркутск : Изд-во ИГУ, 2005. - 180 с. ; 28 см. - Библиогр.: с. 178-180. (100 экз)

4. **Коренблит, Сергей Эммануилович.** Конспект лекций по статистической физике [Электронный ресурс] : учеб. пособие / С. Э. **Коренблит**, С. И. Синеговский. – 2-е изд. -- Иркутский гос. ун-т, Науч. б-ка. - Электрон. текстовые дан. - Иркутск : ИГУ, 2015. **Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неогранич. доступ.** (2005 cd-rom)

5. **Коренблит, Сергей Эммануилович.** Конспект лекций по термодинамике : Учеб. пособие / С. Э. **Коренблит** ; Иркутский гос. ун-т. - Иркутск : Изд-во ИГУ, 2007. - 67 с. ; 30 см. - Библиогр.: с. 66-67. (100 экз)

6. **Коренблит, Сергей Эммануилович.** Конспект лекций по термодинамике [Электронный ресурс] : учеб. пособие / С. Э. Коренблит. - ЭВК. - Иркутск Изд-во: ИГУ, 2007.-. 67 с- **Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неогранич. доступ.**

7. **Коренблит, Сергей Эммануилович.** Двенадцать задач по экологической физике [Текст] : задачник / С. Э. **Коренблит** ; Иркутский гос. ун-т, Физ. фак. - Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. - 56 с. ; 24 см. (50 экз)

8. **Коренблит, Сергей Эммануилович.** Двенадцать задач по экологической физике [Электронный ресурс]: задачник / С. Э. Коренблит. - ЭВК. - Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. - **Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неогранич. доступ.**

### Дополнительная литература

1. Румер, Ю.Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика : Учеб. пособие для студ. физ. спец. вузов / Ю.Б. Румер, М.С. Рывкин. – 3-е изд., стер.. – Новосибирск : Изд-во НГУ, Сиб. унив. изд-во, 1977, 2001. (55 экз)

2. **Базаров, И. П.** Термодинамика [Текст] : [Учеб. для ун-тов по спец. "Физика"] / И.П. **Базаров**. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1983, 1991. (7 экз)

3. **Балеску, Раду.** Равновесная и неравновесная статистическая механика : в 2 т. / Р. Балеску ; Пер. с англ. под ред. Д. Н. Зубарева. – М. : Мир. – 1978. **Т.1., Т.2.** – 1978.: а-ил. – **Пер. изд.:** Equilibrium and nonequilibrium statistical mechanics / Balescu, Radu, 1975. (11 экз)

4. **Задачи по термодинамике и статистической физике** : Пер. с англ. / Под ред. П. Ландсберга. – М. : Мир, 1974. – 640 с. (5 экз)

5. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика : учеб. пособие для студ. физ. спец. ун-тов: В 10 т. / Л.Д. **Ландау**, Е.М. Лифшиц. - 5-е изд., стер. - М. : Физматлит. **Т.5** : Статистическая физика. Ч.1. - 5-е изд., стер. -, 1976, 2001. - 616 с. (49 экз)

6. **Квасников, И. А.** Термодинамика и статистическая физика. Т. 2: Теория равновесных систем: Учеб. пособие / И. А. Квасников. – М. : Изд-во МГУ, 1991, 2003, 2010. – 793 с. : а-ил. (18 экз)

7. **Леонтович, М. А.** Введение в термодинамику. Статистическая физика : учеб. пособие для студ. физ. спец. вузов / М. А. Леонтович. – М. : Наука, 1983. (3 экз)

**8. Базаров, И. П.** Термодинамика и статистическая физика : учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. и спец. "Физика" / И. П. Базаров, Э. В. Геворкян, П. Н. Николаев. – 2-е изд.. – М. : Изд-во МГУ, 1986 (10 экз)

**б) периодические издания**

- нет.

**в) список авторских методических разработок**

- №3,4,5,6,7,8 из списка литературы

**г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

Основные материалы по курсу доступны на персональной странице

[http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/korenb.html](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/korenb.html) , в частности:

[http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/trd.pdf](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/trd.pdf)

[http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/tdsph.pdf](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/tdsph.pdf)

[http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/ah.pdf](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/ah.pdf)

[http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/seminar\\_t.pdf](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/seminar_t.pdf)

[http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/prakt\\_sp.pdf](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/prakt_sp.pdf)

[http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/job\\_1.pdf](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/job_1.pdf)

[http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/job\\_2.pdf](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/job_2.pdf)

[http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/korenb/TDSPh/vopros02.htm](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/korenb/TDSPh/vopros02.htm)

Литература доступна также на <http://library.isu.ru/> - Научная библиотека ИГУ

Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ:

- <https://isu.bibliotech.ru/> - ЭЧЗ «БиблиоТех»;
- <http://e.lanbook.com> - ЭБС «Издательство «Лань»;
- <http://rucont.ru> - ЭБС «Рукопт» - межотраслевая научная библиотека,

**VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Аудитория минимум с двумя досками и мел. Доступ к ресурсам ИГУ из сети Интернет. На лекциях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук.

**VII. Образовательные технологии**

Лекция, практические занятия, индивидуальная работа при сдаче домашних и семестровых заданий.

**VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации**

Фонд оценочных средств представлен в приложении.

Формы текущего контроля: контрольная работа по термодинамике; прием двух семестровых заданий. Форма промежуточного контроля – экзамен.

### 8.1. Варианты контрольных вопросов по термодинамике:

(1) Найти магнитную восприимчивость  $\chi_m(T)$  магнетика с  $M = \chi_m(T)H$  во внешнем поле  $H$ , если его теплоемкость  $C_m$  не зависит от намагниченности  $M$ .

(2) Найти теплоемкости процесса  $\varphi(P, T) = const$ .

(3) Найти термическое уравнение состояния среды, для сжимаемости  $K_T$ , и термического коэффициента давления  $\beta_V$  которой:  $VK_T = 1/\omega(T)$ ,  $P\beta_V = B(V)$ .

8.2. Задачи из еженедельных домашних заданий, указанных в планах семинаров, и двух семестровых заданий.

### 8.3. Примерный список вопросов к экзамену

#### Начала термодинамики

Работа и теплота. I начало термодинамики. II начало термодинамики для квазистатических процессов: формулировки Томсона, Клаузиуса, Каратеодори. Энтропия и абсолютная температура. II начало термодинамики для нестатических (необратимых) процессов. Основное уравнение и основное неравенство термодинамики. III начало термодинамики (закон Нернста).

#### Термодинамические потенциалы

Основные термодинамические потенциалы: адиабатический  $U(S, V, N)$ , свободная энергия  $F(T, V, N) = U - TS$ , энтальпия  $H(S, P, N) = U + PV$ , потенциал Гиббса  $\Phi(T, P, N) = F + PV$ , химический  $\mu(T, P)$  и большой потенциал  $J(T, V, \mu) = F - \Phi = -PV$ . Уравнение Гиббса-Дюгема. Общие условия устойчивости термодинамического равновесия, термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье-Брауна. Условия устойчивости для однородных систем, закон действующих масс.

#### Фазовые переходы

Условия равновесия для гетерогенных систем. Правило фаз Гиббса. Фазовые переходы в однокомпонентных системах. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Уравнения Эренфеста-Кеезома. Термодинамика диэлектриков и магнетиков. Фазовый переход металла из нормального в сверхпроводящее состояние.

#### Ансамбль в статистической механике

Статистический ансамбль, фазовое пространство и функция распределения. Классический ансамбль, теорема Лиувилля, уравнение Лиувилля. Квантовый ансамбль, статистический оператор, матрица плотности, уравнение фон Неймана. Основной постулат статистической физики.

#### Распределения Гиббса.

Равновесные статистические системы. Принцип (Толмена) равных априорных вероятностей для изолированной системы. Микроканоническое распределение Гиббса. Статистический вес и энтропия системы. Квазиклассическое приближение для микроканонического распределения и вычисление термодинамических величин. Энтропия как мера неопределенности состояния системы. Каноническое распределение Гиббса для закрытой системы в термостате. Каноническая статистическая сумма (интеграл) и ее связь со свободной энергией системы. Давление как "отклик" системы на изменение объема. Открытая система в термостате. Большой канонический ансамбль. Статистический оператор для систем с переменным числом частиц. Вычисление термодинамических величин с помощью большого канонического распределения Гиббса. Теорема Нернста.

#### Идеальные системы массивных частиц

Идеальные системы в больцмановском приближении. Квазиклассическое приближение для поступательных степеней свободы. Уравнения состояния больцмановского газа. Распределение Максвелла-Больцмана как одночастичное распределение Гиббса. Теорема о равномерном распределении и средней энергии, приходящейся на одну степень свободы больцмановской системы. Внутренние степени свободы. Характеристическая температура, "замороженные" степени свободы. Вклад вращений и колебаний на примере двухатомной молекулы. Температурная зависимость теплоемкости газа многоатомных молекул. Степень

ионизации газа, формула Саха. Идеальные системы бозонов и фермионов. Представление чисел заполнения. Распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Распределение Максвелла-Больцмана как предельный случай квантовой статистики. Эквивалентность равновесных ансамблей. Флуктуации энергии. Флуктуации полного числа частиц. Базовая формула вычисления флуктуаций основных термодинамических величин. Флуктуации чисел заполнения в ферми- и бозе- системах. Уравнения состояния идеального квантового газа. Параметр вырождения квантовой системы  $\delta = (n / g_s)(h^2 / 2\pi mkT)^{3/2}$ , критерий применимости больцмановского приближения. Поправки к давлению больцмановского газа, обусловленные квантовой статистикой. Вырожденный бозе-газ. Конденсация Бозе-Эйнштейна. Энергия, теплоемкость, давление вырожденного бозе-газа ниже критической температуры. Поведение химического потенциала вблизи критической температуры

### Излучение абсолютно черного тела

Закон Планка для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела. Уравнения состояния фотонного газа. Два классических предела закона Планка.

### Теория теплоемкости твердого тела

Решеточная теплоемкость твердого тела. Акустические и оптические ветви колебаний решетки. Фононы. Теория Эйнштейна и теория Дебая теплоемкости твердого тела.

### Свойства вырожденного ферми-газа

Ферми-газ при  $T=0$  К, уровень Ферми, температура Ферми. Давление вырожденного ферми-газа. Электронная теплоемкость металлов при  $T \ll T_F$ .

### Магнетизм

Магнитные свойства электронного газа: парамагнетизм Паули и диамагнетизм Ландау. Локализованные спины. Ферромагнетизм и "молекулярное" поле Вейса. Обменное взаимодействие Гейзенберга. Домены.

### Слабонеидеальный классический газ

Учет взаимодействия молекул. Вириал. Уравнение состояния слабонеидеального газа. Вириальное разложение.

### 8.4. Пример экзаменационного билета:

1. II начало термодинамики для нестатических (необратимых) процессов. Время релаксации. Основное уравнение и основное неравенство термодинамики.
2. Ферми-газ при  $T=0$  К, энергия Ферми, температура Ферми. Внутренняя энергия и давление абсолютно вырожденного ферми-газа.
3. Для известного термического уравнения состояния идеального вырожденного бозе - газа ( $T < TB$ ) найти его энтропию  $S$  и теплоемкость  $C_V$ , как функции температуры  $T$  и объема  $V$ .

### Пример тестовых заданий для проверки сформированности компетенций, указанных выше п.3:

1	Теплоемкости $C_P$ и $C_V$ соотносятся так, что всегда	1) $C_P < C_V$ 2) $C_P > C_V$ 3) $C_P = C_V$
2	При заданных предельных температурах наибольший КПД имеет термодинамический цикл	1) Карно 2) Отто 3) Дизеля
3	Возможность сколь угодно большого числа частиц в одном состоянии допускается распределением	1) Максвелла-Больцмана 2) Бозе-Эйнштейна 3) Ферми-Дирака
4	Согласно теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы, средняя энергия $kT$ приходится на степень свободы	1) поступательную 2) вращательную 3) колебательную

**Разработчики:**



профессор кафедры теоретической физики

С.Э. Коренблит

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника.

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики

«24» марта 2025 г.

Протокол №6

Зав. кафедрой



С.В. Ловцов

*Настоящая программа, не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.*