

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

**Физический факультет  
Кафедра теоретической физики**



**Рабочая программа дисциплины  
ТЕРМОДИНАМИКА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения: **Очная**

Семестр	Общий объём	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Прием заданий			Консультации	Зачёт	Дифференцированный зачёт	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	144	32	48	16	24	18	4			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 102 часа										
Компетенции: ОПК-1										

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

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

## Содержание

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

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

Дисциплина (курс) «Термодинамика и статистическая физика» имеет своей целью дать систематическое изложение подходов и методов термодинамики и равновесной статистической физики, научить студентов использовать эти методы в приложении к широкому кругу физическим систем и явлений. В связи с этим рассматриваются: основные законы термодинамики, основные принципы, лежащие в основании статистической физики, что такое статистический ансамбль, общие свойства и различия между микроканоническим, каноническим и большим каноническим ансамблями. Курс должен служить основой для изучения последующих физических курсов и спецкурсов профильных выпускающих кафедр.

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ОПК-1.</b> Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности</p>	<p><b>ОПК-1.1.</b> Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p><b>ОПК -1.2.</b> Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p><b>Знать:</b> основные законы термодинамики, основные принципы, лежащие в основании статистической физики, что такое статистический ансамбль, общие свойства и различия между микроканоническим, каноническим и большим каноническим ансамблями, круг явлений, в которых возможно применение методов термодинамики и статистической физики.</p> <p><b>Уметь:</b> зная законы поведения частиц, из которых построена система (молекулы, атомы, ионы и т. д.), устанавливать законы поведения макроскопического количества вещества для классических газов, плазмы, вырожденного электронного газа, при фазовых переходах первого рода, получать условия равновесия для реакций и процессов растворения.</p> <p><b>Владеть:</b> методами получения термодинамических соотношений между физическими величинами, методами нахождения термодинамических характеристик вещества, пользуясь статистическими ансамблями и законами взаимодействия отдельных частиц.</p>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс относится к циклу общефизических дисциплин и реализуется в весеннем семестре 3-го курса для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика. В результате прохождения курса студенты отделения общей и фундаментальной физики физического факультета должны овладеть основными понятиями и методами термодинамики и статистической физики и уметь применять эти знания к описанию свойств классических газов, плазмы, вырожденного электронного газа, фазовых переходах первого рода, получать условия равновесия для реакций и процессов растворения. Для успешного освоения курса необходимо знание основ линейной алгебры, математического анализа, теории функций комплексной переменной, методов математической физики, хорошие знания физических курсов, изучаемых студентами ранее: классической и квантовой механики, электродинамики, также необходимо умение применять эти знания при решении задач.

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

Семестр	Общий объём	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Прием заданий			Консультации	Зачёт	Дифференцированный зачёт	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	144	32	48	16	24	18	4			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 102 часа										
Компетенции: ОПК-1										

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, задачи для самостоятельного решения, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет **144** академических часа / **4** зачётные единицы:

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 48 часов;
- прием заданий – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 24 часа;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультация и экзамен) – 24 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 102 часа.

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Термодинамика и статистическая физика» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 6 семестре. Общая трудоёмкость дисциплины составляет 144 академических часа / 4 зачётные единицы.

Все практические занятия проводятся в интерактивной форме. Каждый студент группы решает задачи (примеры заданий приведены в разделе 10), при этом преподаватель отслеживает ход решения каждого студента и корректирует его индивидуально по мере необходимости. Практикуется коллективное обсуждение решений. Умение студента объяснять свой метод решения и отстаивать его, отвечая на вопросы сокурсников и преподавателя, развивает профессиональные навыки, которые будут незаменимы в дальнейшей профессиональной деятельности. Важным элементом является еженедельный «приём заданий», на котором происходит индивидуальное обсуждение задач с каждым студентом. Это позволяет вовремя выявлять проблемы и помочь студенту с освоением материала курса.

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)						Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции (кол-во часов)	Практические занятия (кол-во часов)	Прием заданий				
1	Основные понятия и постулаты термодинамики. Функция состояния – температура, и её свойства. Формулировки I-го и II-го начал термодинамики. Цикл и теорема Карно, абсолютная термодинамическая шкала температур.	1	6	2	3		1			
2	Неравенство Клаузиуса. Энтропия – функция состояния. Закон возрастания энтропии для адиабатически изолированной системы.	2	8	2	3	2	1			
3	Термодинамические потенциалы. Зависимость термодинамических величин от числа частиц. Максимальная работа, производимая телом, находящимся во внешней среде.	3	8	2	3	1	2			
4	Характер изменения термодинамических потенциалов F и Ф (свободная энергия и потенциал Гиббса) при необратимых процессах. Термодинамические неравенства. Принцип Ле Шателье.	4	8	2	3	1	2			
5	Метод статистических ансамблей Гиббса в классической статистике. Теорема Лиувилля. Микроканоническое распределение. Микроканоническое распределение в квантовой статистике. Статистическая матрица (матрица плотности).	5	8	2	3	1	2			
6	Каноническое распределение (распределение Гиббса). Идеальный бoльцмановский газ. Распределение Максвелла. Классический закон равнораспределения.	6	7	2	3		2			
7	Многоатомный идеальный газ, колебательные и вращательные степени свободы. Молекулы, состоящие из одинаковых атомов, орто- и парамолекулы.	7	7	2	3	1	1			

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)						Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции (кол-во часов)	Практические занятия (кол-во часов)	Прием заданий				
8	III начало термодинамики (принцип Нернста), поведение термодинамических величин при $T \rightarrow 0$ . Условие равновесия при реакциях. Закон действующих масс. Теплота реакции и изменение объёма в результате реакции. Степень ионизации газа.	8	6	2	3		1			
9	Отсутствие магнетизма классического газа. Парамагнетизм Паули и диамагнетизм Ландау. Условия равновесия фаз. Теплота (энтальпия) перехода. Уравнение Клайперона-Клаузиуса.	9	8	2	3	2	1			
10	Образование зародышей при фазовых переходах. Явления перегрева и переохлаждения. Многокомпонентные системы (растворы). Потенциал Гиббса для двухкомпонентной системы. Правило фаз Гиббса. Тепловой эффект и изменение объёма при растворении.	10	8	2	3	1	2			
11	Слабые растворы, осмотическое давление, изменение температуры плавления/кипения и давления насыщенного пара при растворении, растворение газа в жидкости/твёрдом теле.	11	8	2	3	1	2			
12	Большое каноническое распределение (распределение Гиббса с переменным числом частиц). $\Omega$ -потенциал.	12	8	2	3	1	2			
13	Вырожденные газы, ферми- и бозе-статистика. Термодинамические величины вырожденного ферми-газа, теплоёмкость.	13-14	14	4	6	2	2			
14	Неидеальные газы. Вириальное разложение. Второй вириальный коэффициент. Газ ван-дер-Ваальса. Закон соответственных состояний. Правило Максвелла.	15	8	2	3	1	2			
15	Термодинамические величины классической плазмы. Дебаевское экранирование.	16	8	2	3	2	1			
16	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18					18		
17	Консультации		4						4	
18	Экзамен		2						2	
	<b>Всего</b>		<b>144</b>	<b>32</b>	<b>48</b>	<b>16</b>	<b>24</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

### Программа практических занятий (48 часов)

Занятие (каждое занятие – 2 часа)\*

Уравнение состояния идеального газа (1.3). Расчёт КПД цикла Отто. Адиабатическая атмосфера, условие возникновения конвективного течения.
Задачи на вывод соотношений между производными термодинамических величин. Имеется идеальная тепловая машина и три одинаковых куба, два из них имеют температуру 300 К, один – 100 К. До какой максимальной температуры можно нагреть один из кубов?
Термодинамика диэлектриков (1.6, 1.7, 1.9, 1.10).
Микроканоническое распределение: (2.1, 2.2, 2.6, 2.10), метод адиабатического размагничивания (2.5) для получения низких температур.
Каноническое распределение: решить задачи (2.2, 2.6), используя каноническое распределение. Оценка температуры диссоциации азота, $N_2 \rightarrow N+N$ , используя результат задачи (2.6).
Больцмановский газ: найти число ударов о стенку и давление из распределения Максвелла по скоростям (3.6), оценка температуры в центре Солнца (3.1), задача (3.2).
Газ во внешнем поле: (3.3, 3.4, 3.12), также задача 3.9. Газ молекул, обладающих собственными дипольным моментом в электрическом поле.
Задача (3.13), расчёт термодинамических величин многоатомных газов, внутренние степени свободы, свойства колебательной/вращательной статистической суммы (3.15).
Столкновения в газе (3.9). Задача (3.21).
Орто- и парамодификации двухатомных молекул, состоящих из одинаковых атомов, свойства дейтерия $D_2$ при низких температурах.
Магнетизм классического электронного газа, получить и проанализировать вклады от орбитального движения (диамагнетизм) и от спина электрона (парамагнетизм). Энтропия и теплоёмкость такого газа.
Реакции в газах: диссоциация двухатомной молекулы, также задачи (3.16, 3.20).
Фазовые переходы, уравнение Клайперона-Клаузиуса, зависимость теплоты перехода от температуры (6.6, 6.7, 6.8.), плотность насыщенного пара вдоль кривого перехода. Влияние атмосферного воздуха на величину давления насыщенного пара.
Образование зародышей при фазовых переходах, условия равновесия для заряженной капли воды в атмосфере насыщенного пара. Также задачи (6.9, 6.10).
Термодинамические величины слабого раствора: изменение температуры плавления/кипения и давления насыщенного пара при растворении, растворение газа в жидкости/твёрдом теле.
Неидеальные газы. Вириальное разложение. Газ ван-дер-Ваальса. (6.1, 6.3, 6.4).
Эффект Джоуля-Томсона, найти кривую инверсии для газа ван-дер-Ваальса.
Построить вириальное разложение для смеси двух различных идеальных газов с числом частиц $N_1$ и $N_2$ . Найти выражение для второго вириального коэффициента $B_2$ и химических потенциалов $\mu_1$ и $\mu_2$ . При $N_1 \ll N_2$ убедиться, что выражения для $\mu_1$ и $\mu_2$ согласуются с результатами для слабого раствора.
Термодинамические величины классической плазмы. Поправки к теплоёмкости и уравнению состояния. Учёт кулоновского взаимодействия между ионами в растворе сильного электролита. Понижение температуры замерзания воды, обусловленного кулоновским взаимодействием, при растворении в воде соли.
Получить распределения Ферми и Бозе, используя большое каноническое распределение, рассматривая систему – одночастичное состояние в идеальном газе. Получить формулу для $\Omega$ -потенциала газа и общее соотношение, $E=3/2 PV$ , и уравнение адиабаты. Свойства вырожденного ферми-газа при $T=0$ , оценки для электронов в металле и атоме (4.2, 4.3, 4.4, 4.10).

Свойства вырожденного ферми-газа при конечной температуре: давление, энтропия, теплоёмкость.
Вырожденный ферми-газ при конечной температуре и во внешнем поле $U(r)=m\omega^2 r^2/2$ (4.11), найти теплоёмкость, химический потенциал, зависимость концентрации и давления от $\mu$ .
Слабовырожденный ферми-газ, квантовые поправки к термодинамическим величинам (4.8, 4.9).

\* дана нумерация по задачнику

[Коткин Г.Л., Образовский Е.Г. Задачи по статистической физике.]

### Самостоятельная работа студентов (42 часа)

Перечень занятий на СРС	Объём, час
Подготовка к практическим занятиям.	14
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	10
Подготовка к экзамену	18

#### 5. Перечень учебной литературы.

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика. — Изд. 3-е, испр. и доп. — М.: Наука, 1990. — 591 с.: ил.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, Ч.1. — Изд. 3-е, доп. — М.: Наука, 1976. — 583 с.: ил. — (Теоретическая физика, т. V).
3. Коткин Г.Л. Лекции по статистической физике: учебное пособие: [для студентов физических факультетов вузов]. — М-во образования Рос. Федерации, Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2003. — 171 с.: ил.
4. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. — Изд. 3-е, стер. — Новосибирск: Сиб. унив. изд-во: Изд-во Новосиб. ун-та, 2001. — 608 с.: ил.
5. Коткин Г.Л., Образовский Е.Г. Задачи по статистической физике: учебное пособие: [для студентов физического факультета НГУ]. — Федер. агентство по образованию, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак. — Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2007. — 159 с.: ил.
6. Гинзбург И.Ф. Введение в физику твёрдого тела Основы квантовой механики и статистической физики с отдельными задачами физики твёрдого тела: учеб. пособие [для вузов]. — Санкт-Петербург и др.: Лань, 2007. — 537 с.
7. Кубо Р. Статистическая механика. — Изд. 2-е, стер. — М.: УРСС: КомКнига, 2007. — 452 с.: ил.
8. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. — М.: Наука, 1977. — 336 с.: ил.

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

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика. — Изд. 3-е, испр. и доп. — М.: Наука, 1990. — 591 с.: ил.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, Ч.1. — Изд. 3-е, доп. — М.: Наука, 1976. — 583 с.: ил. — (Теоретическая физика, т. V).

3. Коткин Г.Л. Лекции по статистической физике: учебное пособие: [для студентов физических факультетов вузов]. — М-во образования Рос. Федерации, Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2003. — 171 с.: ил.
4. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. — Изд. 3-е, стер. — Новосибирск: Сиб. унив. изд-во: Изд-во Новосиб. ун-та, 2001. — 608 с.: ил.

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

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

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

### **7.1. Современные профессиональные базы данных**

Не используются.

### **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

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

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

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

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

Для реализации дисциплины «Термодинамика и статистическая физика» используются специальные помещения:

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

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

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

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

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно

«Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

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

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

#### *Текущий контроль*

Текущий контроль осуществляется на практических занятиях путём отслеживания преподавателем хода решения задач каждым студентом и в форме интерактивного приёма задач из задания. В течение каждого семестра проводится приём заданий. Результаты текущего контроля служат основанием для выставления оценок в ведомость контрольной недели на факультете, а решение, и сдача всех задач из задания является необходимым условием получения положительной оценки на экзамене.

#### *Промежуточная аттестация.*

Для контроля усвоения дисциплины учебным планом предусмотрен экзамен в конце семестра. Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

Освоение компетенции оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ОПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области термодинамики и статистической физики в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ОПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенции принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда компетенция освоена не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ОПК-1.1. Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения про-	<b>Знать:</b> основные законы термодинамики, основные принципы, лежащие в основании статистической физики, что такое статистический ансамбль, общие свойства и различия между микроканоническим, каноническим и большим каноническим ансамблями, круг явлений, в которых возможно применение	Опрос Контрольная работа Экзамен.

<p>фессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>методов термодинамики и статистической физики.</p>	
<p><b>ОПК -1.2.</b> Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p><b>Уметь:</b> зная законы поведения частиц, из которых построена система (молекулы, атомы, ионы и т. д.), устанавливать законы поведения макроскопического количества вещества для классических газов, плазмы, вырожденного электронного газа, при фазовых переходах первого рода, получать условия равновесия для реакций и процессов растворения.  <b>Владеть:</b> методами получения термодинамических соотношений между физическими величинами, методами нахождения термодинамических характеристик вещества, пользуясь статистическими ансамблями и законами взаимодействия отдельных частиц.</p>	<p>Опрос  Контрольная работа  Экзамен.</p>

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

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (2 балла)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ОПК-1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ОПК-1.2 ОПК-1.3	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

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

### ЗАДАНИЕ №1

1. Конденсатор заполнен диэлектриком, для которого  $\mathbf{D} = (\varepsilon(T) + \alpha(T)E^2) \mathbf{E}$ . Сколько тепла выделится при изотермической зарядке конденсатора? На сколько изменится температура конденсатора, если считать его теплоизолированным? Теплоёмкость конденсатора  $C$ . Изменение температуры можно считать малым.
2. Диполь  $q$ , находящийся на расстоянии  $z$  от плоской поверхности диэлектрика, ориентирован вдоль плоскости. Какое количество тепла выделится в диэлектрике при постоянной температуре  $T$ , если диполь медленно повернуть так, чтобы он оказался ориентирован поперек плоскости?
3. В "ногах" П-образной стеклянной трубки находится этанол ( $C_2H_6O$ ). Разность уровней жидкости составляет 10 см. Спустя какое время разность уровней уменьшится вдвое? Над жидкостью находятся только пары этанола. Температура равна 35 С, при такой температуре давление насыщенных паров равно  $P=100$  мм рт.ст., плотность жидкого этанола  $\rho=0.78$  г/см<sup>3</sup>. Считать, что каждая молекула газа, столкнувшаяся с поверхностью жидкости, прилипает к ней (коэффициент аккомодации равен 1).
4.  $N$  шаров движутся на наклонном плоском бильярде, испытывая упругие столкновения друг с другом и с бортиками. Определить распределение шаров по высоте (полагая, что верхнего бортика шары не достигают и что размеры шариков достаточно малы). Для замкнутой системы шаров справедливо микрочаноническое распределение.

### ЗАДАНИЕ №2

1. В баллоне с углекислым газом поддерживается температура  $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давление  $P_0=1.5$  атм. Из баллона вытекает в атмосферу струя газа. Найти её скорость и температуру газа в струе. Время разгона газа велико по сравнению со временем  $\tau$  релаксации колебаний молекул  $\text{CO}_2$ . Частоты колебаний молекулы  $\text{CO}_2$  -  $\nu$  изгибн./с =  $667\text{ см}^{-1}$ ,  $\nu$  симм./с =  $1385\text{ см}^{-1}$ ,  $\nu$  антисимм./с =  $2349\text{ см}^{-1}$ . На сколько мы ошибёмся, если не учтём колебаний молекул?
2. Примесь дейтерия (D) в естественном водороде (H) составляет 0,015 %. Найти отношение концентраций молекул  $\text{D}_2$  и HD при комнатной температуре.
3. Рассчитать равновесную концентрацию атомов иода при температуре  $T = 500\text{ }^{\circ}\text{K}$  в сосуде, заполненном 0.1 торр молекулярного иода ( $\text{I}_2$ ). Энергия связи молекулы  $\text{I}_2$  - 35.6 ккал/моль, частота колебаний  $\nu = 213\text{ см}^{-1}$ , размер молекулы -  $r(\text{I-I})=2.67\text{ \AA}$ , а основное состояние атома иода -  $^2\text{P}_{3/2}$ .
4. Водород, имевший комнатную температуру, быстро охладили до температуры  $T_0 \ll T_{\text{rot}} = \hbar^2/2I$ , так что соотношение чисел молекул орто- и параводорода осталось равно 3:1. Затем происходит переход к соотношению, равновесному при низкой температуре. Какова будет в итоге температура водорода, если принять, что он теплоизолирован и объём его неизменен? (Уравнение придется решать численно).

### ЗАДАНИЕ №3

1. На сколько сместится температура и давление тройной точки воды при наличии в сосуде воздуха под давлением 1 атм.?
2. Теплоизолированный объём наполнен насыщенным водяным паром при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Объём увеличивают на 15 %. Найти равновесный радиус капельки зародыша.
3. В цилиндре, закрытом поршнем, имеется раствор концентрации  $c$ . Поршень непроницаем для молекул растворенного вещества и проницаем для молекул растворителя. При постоянной температуре  $T$  поршень медленно вдвигают так, что в конце этого процесса под поршнем остается только чистое растворенное вещество. Рассчитать механическую работу, затрачиваемую при таком способе разделения раствора в расчете на одну молекулу растворенного вещества. Считать что концентрация насыщенного раствора при данной температуре известна  $c_0(T)$ , и что  $c, c_0 \ll 1$ .
4. Больцмановский газ заряженных частиц находится в поле  $U(x, y, z) = m\omega^2/2(x^2 + y^2 + z^2)$  и постоянном однородном магнитном поле  $n$ , направленном по оси  $z$ . Пренебрегая взаимодействием зарядов между собой, найти магнитный момент газа. Выразить магнитную восприимчивость в пределе низких и высоких температур.

### ЗАДАНИЕ №4

1. Найти магнитный момент и магнитную восприимчивость вырожденного электронного газа, связанные с магнитным моментом электрона.
2. Идеальный ферми-газ при низкой температуре помещен в поле тяжести. Вычислить высоту центра тяжести столба газа и его теплоемкость. Найти зависимость плотности газа от высоты при нулевой температуре и температуре, близкой к нулевой.
3. Найти связь между равновесным радиусом  $R$  и массой  $M$  звезды – белого карлика, в котором основной вклад в давление вносит полностью вырожденный электронный газ (газ нерелятивистский, вычисления проводить на уровне оценки, воспользовавшись вириальной теоремой)

## Примерные вопросы на экзамен

Основные понятия и постулаты термодинамики. Релаксация и термодинамическое равновесие. Функция состояния -- температура, и ее свойства. Формулировки I-го и II-го начал термодинамики.

Найти распределение по компоненте скорости вдоль оси  $x$ ,  $d\omega/dv_x$ , для вырожденного ферми-газа при нулевой температуре,  $T=0$ . Определить среднюю энергию частиц газа, соударяющихся со стенкой.

Формулировка II-го начала термодинамики по Клаузиусу. Цикл и теорема Карно, абсолютная термодинамическая шкала температур.

В двумерном газе двухатомных молекул энергия вращения дается формулой  $E_m = \hbar^2 m^2 / 2I$ , где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Найти вращательную часть теплоемкости при высокой температуре  $T \gg \hbar^2 / 2I$  и при низкой температуре  $T \ll \hbar^2 / 2I$  (в последнем случае учесть первые два вращательных уровня).

Формулировка II-го начала термодинамики по Клаузиусу. Неравенство Клаузиуса.

В цилиндре под поршнем помещена вода, над которой находится смесь воздуха и насыщенных водяных паров. Начальное давление равно атмосферному. Затем давление на поршень увеличивается в два раза. На сколько процентов изменится давление пара в цилиндре, если температура  $T=300$  °К сохраняется неизменной?

Равенство Клаузиуса для квазистатического процесса. Энтропия - функция состояния, и  $\partial Q = T dS$ . Закон возрастания энтропии для адиабатически изолированной системы.

Найти распределение по компоненте скорости вдоль оси  $x$ ,  $d\omega/dv_x$ , для вырожденного ферми-газа при нулевой температуре,  $T=0$ . Используя полученный результат, найти давление.

Соотношение  $dU = TdS - PdV$  как следствие I-го и II-го начал термодинамики для квазистатических процессов. Эквивалентность PV- и TS- плоскостей. Соотношения между производными термодинамических величин. Например, доказать что  $(\partial U / \partial V)_T = T(\partial P / \partial T)_{V-P}$ .

Двумерный больцмановский газ находится в потенциале  $U(x,y) = m\omega^2(x^2 + y^2)/2$ . Определить зависимость плотности частиц от радиуса, считая справедливым микроканоническое распределение.

Термодинамические потенциалы. Зависимость термодинамических величин от числа частиц.

Два различных идеальных газа, находящихся в объемах  $V_1$  и  $V_2$ , имели одинаковые температуры и давления и были разделены перегородкой. Перегородку убирают, и газы смешиваются, заполняя весь объем  $V_1 + V_2$ . Найти изменение энтропии в этом процессе. Число частиц газов  $N_1$  и  $N_2$ .

Максимальная работа, производимая телом, находящимся во внешней среде. Как изменяются термодинамические потенциалы  $F$  и  $\Phi$  (свободная энергия и потенциал Гиббса) при необратимых процессах (при постоянных  $T, V$  и  $T, P$ .)

$N$  частиц больцмановского газа  $N \gg 1$  находятся в центральном поле  $U(r) = m\omega^2 r^2 / 2$  при температуре  $T$ . Найти давление газа в точке  $r=0$ .

Термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье.

Газ, состоящий из  $N$  молекул водорода, охлаждается в два этапа. На первом этапе его быстро охладил от температуры  $T$  до температуры  $T_0$ , причем  $T \gg T_{\text{rot}}$  а  $T_0 \ll T_{\text{rot}}$ , так что соотношение орто- и пара- водорода осталось равным 3:1. На втором этапе происходит более медленный переход к полному равновесию с термостатом при температуре  $T_0$ . Найти изменение энтропии газа на втором этапе этого процесса.

Метод статистических ансамблей Гиббса в классической статистике. Теорема Лиувилля. Микроканоническое распределение.

Найти теплоемкость больцмановского газа (в расчете на одну частицу) в сосуде высотой  $h$  в поле тяжести при  $mgh \gg T$  и  $mgh \ll T$ .

Микроканоническое распределение в квантовой статистике. Статистическая матрица (матрица плотности).

Оценить изменение температуры кристаллизации воды при растворении в ней соли  $\text{NaCl}$  ( $\rho_{\text{NaCl}} = 58.44$  г./моль) в концентрации насыщенного раствора: 35.7 г. соли на 100 г. воды. Теплота плавления льда  $\lambda \sim 6$  кДж./моль.

Каноническое распределение (распределение Гиббса). Статистическая сумма, энтропия и свободная энергия.

Оценить изменение температуры кипения воды если подняться на гору высотой 1 км, теплота парообразования воды при  $T = 100$  °C равна примерно 40.7 кДж./моль.

Идеальный больцмановский газ. Распределение Максвелла. Классический закон равнораспределения.

Давление больцмановского газа в присутствии равновесного газа фотонов описывается формулой  $P = N T/V + a T^4$ , где  $N$ - число частиц,  $V$ -объем,  $a$ - постоянная. Теплоемкость системы дается формулой  $C_V = 3N/2 + 12aVT^3$ . Найти энтропию газа  $S(T, V)$ .

Идеальный больцмановский газ. Термодинамические величины одноатомного газа.

Имеется раствор концентрации  $c = n/N$ , где  $N$ - число частиц растворителя, а  $n$ - число частиц растворяемого вещества. Получить выражение для минимальной работы, требуемой для полного разделения раствора на чистый растворитель и растворимое вещество, считая что концентрация насыщенного раствора  $c_0(P, T)$  известна, и что  $c, c_0 \ll 1$ .

Идеальный больцмановский газ. Термодинамические величины двухатомного газа.

Два тела имеющих различные температуры,  $T_1$  и  $T_2$ , и теплоемкости  $C_1$  и  $C_2$  приводят в тепловой контакт. Найти изменение энтропии каждого из тел и изменение энтропии всей системы.

Идеальный больцмановский газ. Молекулы, состоящие из одинаковых атомов, орто- и парамодификации.

Доказать что  $(\partial N/\partial \mu)_{T, V} = -N^2/V^2 (\partial V/\partial P)_{T, N}$ , где  $N$  – число частиц,  $\mu$  – химический потенциал.

III начало термодинамики (принцип Нернста), поведение термодинамических величин при  $T \rightarrow 0$ .

Газ состоящий из  $N$  молекул водорода быстро охладил от температуры  $T$  до температуры  $T_0$ , причем  $T \gg T_{\text{rot}}$  а  $T_0 \ll T_{\text{rot}}$ , так что соотношение орто- и пара- водорода осталось равным 3:1. Найти изменение энтропии газа в этом процессе.

Условие равновесия при реакциях. Закон действующих масс.

Давление одноатомного неидеального газа  $P = NT/V[1 + N/V B_2(T)]$ . Найти внутреннюю энергию газа, как функцию  $T$  и  $V$ .

Теплота реакции и изменение объема в результате реакции.

Найти теплоемкость двухуровневой системы, верхний уровень которой имеет очень высокую кратность вырождения  $g$  так что даже  $\log g \gg 1$ .

Степень ионизации газа.

В термостате находится система, состоящая из  $N$  невзаимодействующих частиц. Каждая частица может находиться только на одном из трех энергетических уровней  $-\epsilon, 0, \epsilon$ . Уровень с энергией равной  $0$  двукратно вырожден. Найти теплоемкость системы.

Отсутствие магнетизма классического газа. Для классического электронного газа: парамагнетизм Паули и диамагнетизм Ландау.

Для газа ван-дер-Вальса найти  $C_p - C_v$ .

Условия равновесия фаз. Теплота (энтальпия) перехода. Уравнение Клайперона-Клаузиуса.

Из сосуда в вакуум через маленькое отверстие вылетает больцмановский газ. Температура газа в сосуде  $T$ . Найти среднюю кинетическую энергию вылетающих молекул.

Образование зародышей при фазовых переходах. Явления перегрева и переохлаждения.

Получить термодинамические соотношения (в дифференциальной форме) описывающие изменение температуры при малом изменении давления в процессе Джоуля-Томсона и малом изменении объема в процессе Гей-Люссака (изоэнергетический процесс).

Многокомпонентные системы (растворы). Потенциал Гиббса для двухкомпонентной системы. Правило фаз Гиббса.

Найти энергию, теплоемкость, энтропию квантового осциллятора, находящегося в контакте с термостатом при температуре  $T$ .

Слабые растворы. Осмотическое давление (закон Вант-Гоффа).

Оценить изменение температуры плавления льда при увеличении давления от 1 атм. до 100 атм. Теплота плавления льда  $\lambda \sim 6$  кДж./моль.

Слабые растворы. Изменение температуры плавления/кипения и давления насыщенного пара (закон Рауля) при растворении.

Рассматривая нейтронную звезду как сгусток вырожденного ферми-газа, удерживаемый собственным гравитационным полем, дать оценку радиуса такой звезды. Масса нейтронной звезды порядка массы Солнца  $\sim 10^{30}$  кг. Гравитационная постоянная  $\gamma = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ .

Слабые растворы. Растворение газа в жидкости/твердом теле (закон Генри).

Оценить изменение температуры кипения воды при растворении в ней соли  $\text{NaCl}$  ( $\rho_{\text{NaCl}} = 58.44$  г./моль) в концентрации насыщенного раствора: 35.7 г. соли на 100 г. воды. Теплота парообразования воды  $\lambda \sim 40.7$  кДж./моль.

Тепловой эффект и изменение объема при растворении.

В объеме  $V$  при температуре  $T$  находится  $N$  электронов  $e^-$ . Найти какое (небольшое) равновесное количество позитронов образуется за счет реакций аннигиляции электронов и позитронов в два и большее количество фотонов:  $e^+ + e^- = n \gamma$ , где  $n = 2, 3, \dots$ . Считать, что температура много меньше энергии покоя электрона,  $T \ll m_e c^2$ , а также, считать известным что химический потенциал фотонного газа равен нулю,  $\mu_\gamma = 0$ .

Неидеальные газы. Вириальное разложение. Второй вириальный коэффициент.  
Ферми-газ находится в объеме  $V$ , число частиц  $N$ . Найти температуру, при которой химический потенциал газа обращается в ноль.

Газ ван-дер-Ваальса. Закон соответственных состояний. Правило Максвелла.  
Найти теплоемкость вырожденного двумерного ферми-газа.

Термодинамические величины классической плазмы.  
Ферми-газ находится в центральном поле  $U(r) = \beta r^3$ . Число частиц  $N$ , температура  $T=0$ .  
Найти зависимость концентрации и давления от  $r$ .

Большое каноническое распределение (распределение Гиббса с переменным числом частиц).  $\Omega$  - потенциал.

Звезду белый-карлик удерживает от гравитационного коллапса давление вырожденного электронного газа. Оценить среднюю кинетическую энергию электронов и сравнить полученное выражение с энергией покоя электрона,  $m_e c^2$ , считая массу звезды порядка массы Солнца,  $\sim 10^{30}$  кг. Гравитационная постоянная  $\gamma = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ .

Ферми и Бозе статистика для идеального газа как следствие распределения Гиббса с переменным числом частиц.

Найти теплоемкость больцмановского газа (в расчете на одну частицу) в сосуде объемом  $V$ , где в части объема  $V_0$  есть потенциальная яма глубиной  $-U_0$ .

Вырожденный Ферми газ и его теплоемкость.

Выразить разность теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении,  $C_p - C_v$ , через предполагаемое известным уравнение состояния  $P=P(T, V)$ .

Вырожденный Ферми газ. Флуктуации чисел заполнения Ферми газа из распределения Гиббса с переменным числом частиц.

Найти теплоемкость классического, одномерного ангармонического осциллятора, находящегося в контакте с термостатом при температуре  $T$ . Потенциал  $U(x) = \alpha x^4$ .

### Дополнительные вопросы для экзамена

Найти теплоемкость одноатомного больцмановского газа, находящегося в сферически симметричном потенциале  $U(r) = a/r$ .

Показать, что в процессе Джоуля-Томсона энтропия газа увеличивается.

Найти характер зависимости статистического веса от энергии  $E$  для системы, состоящей из  $N$  частиц одноатомного идеального газа, который находится в фиксированном объеме. Пусть данная система находится в контакте с термостатом при температуре  $T$ , таким образом, ее энергия может меняться за счет обмена теплом с термостатом. Используя полученный ранее результат и каноническое распределение найти распределение по энергии газа  $d\omega(E)/dE$ , среднюю энергию  $\langle E \rangle$  и среднеквадратичное отклонение:  $\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2$ .

Ферми-газ находится в центральном поле  $U(r) = 1/2 k r^2$  при температуре  $T=0$ . Найти среднюю энергию, приходящуюся на одну частицу.

Ферми-газ является слабыврожденным  $(mT)^{3/2}/(2\pi\hbar)^3 \gg N/V$ . Найти первую квантовую поправку для химического потенциала и теплоемкости.

### Пример экзаменационного билета

1. Метод статистических ансамблей Гиббса в классической статистике. Теорема Лиувилля. Микроканоническое распределение.
2. Найти энергию, теплоёмкость и энтропию квантового осциллятора, находящегося в контакте с термостатом при температуре  $T$ .

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

**Лист актуализации рабочей программы  
по дисциплине «Термодинамика и статистическая физика»  
по направлению подготовки 03.03.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

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