

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 10.08.2023 16:24:56  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:

Руководитель ООП

Б.Б.Педько



«30»

мая

2023 г.

Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

**Термодинамика и статистическая физика**

Направление подготовки

03.03.03 Радиофизика

профиль

Физика и технология материалов и устройств радиоэлектроники

Для студентов

4 курса, очной формы обучения

Составитель: д.ф.-м.н., профессор Самсонов В.М.

*Самсонов*

Тверь, 2023

## **I. Аннотация**

### **1. Цель и задачи дисциплины**

**Целью** освоения дисциплины является: овладение основными методами и подходами термодинамики и статистической физики.

**Задачами** освоения дисциплины являются:

Изучение основ термодинамики и статистической физики;

Приобретение навыков применения основных знаний в области термодинамики и статистической физики для решения стандартных задач;

Приобретение навыков применения методов термодинамики и статистической физики к решению задач физики конденсированного состояния, включая описание таких систем, как электронный и фононный газы.

### **2. Место дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина «Термодинамика и статистическая физика» изучается в модуле Теоретическая физика Блока 1. Дисциплины обязательной части учебного плана ООП.

Данная учебная дисциплина непосредственно связана с дисциплинами «Квантовая механика», «Теория вероятностей и математическая статистика».

**3. Объем дисциплины:** 7 зачетных единиц, 252 академических часа, в том числе:

**контактная аудиторная работа:** лекции 56 часов, практические занятия 56 часа;

**самостоятельная работа:** 140 часов, в том числе контроль 27 часов.

**4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
-------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------

УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1. Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие; УК-1.2. Определяет, интерпретирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи; УК-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки.
ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.	ОПК-1.1. Применяет базовые знания в области физико-математических наук для решения задач профессиональной деятельности.
ОПК-2. Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.	ОПК-2.2. Проводит теоретическое изучение объектов, систем и процессов в рамках темы научного исследования.

## 5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения

Зачет в 7 семестре, экзамен в 8 семестре.

**6. Язык преподавания:** русский.

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

### 1. Для студентов очной формы обучения

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)				Самостоятельная работа, в том числе Контроль (час.)
		Лекции		Практические занятия		
		всего	в т.ч. ПП	всего	в т.ч. ПП	
<b>Введение.</b> Предмет и методы термодинамики и статистической физики. Макроскопические системы различной природы. История развития термодинамики и статистической физики.	3	1				2
<b>Основы термодинамики.</b> Основные понятия термодинамики: термодинамическая система, параметры состояния, термодинамическое равновесие. Температура.	8	2		2		4

Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия. Работа и теплота. Теплоемкость. Применение первого закона к идеальным системам: идеальному газу и фотонному газу. Понятие о сложных термодинамических системах.	8	2		2		4
Второй закон термодинамики. Энтропийная формулировка 2-го закона. Поток и производство энтропии.	7	2		2		3
Третий закон термодинамики. «Нулевой» закон и его роль.	6	1		2		3
Математический аппарат термодинамики: метод однородных функций Эйлера, дифференциальные формы Пфаффа, метод якобианов преобразования.	8	2		2		4
Метод характеристических функций. Термодинамика открытых систем. Химический потенциал.	8	2		2		4
Термодинамическая фаза. Фазовые переходы 1-го и 2-го рода. Условия равновесия гетерогенной системы, состоящей из 2-х гомогенных фаз. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.	8	2		2		4
Теория Ландау фазовых переходов 2-го рода.	5	1		1		3
Понятие о теории зарождения новой фазы. Работа нуклеации. Критический зародыш по Гиббсу.	8	2		2		4
<b>Введение в статистическую физику.</b> Метод статистической физики. Основные понятия теории вероятностей. Статистические функции распределения. Усреднение. Понятие о флуктуациях.	5	1		1		3
Классическое и квантовое уравнение Лиувилля.	7	2		2		3
<b>Статистическая теория идеальных систем</b> Распределение Максвелла. Распределение Максвелла-Больцмана.	8	2		2		4
Теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы.	8	2		2		4
Теория теплоемкости идеального газа.	8	2		2		4
Статистика Бозе-Эйнштейна.	8	2		2		4
Статистика Ферми-Дирака.	8	2		2		4
Переход к классической статистике Максвелла-Больцмана. Сравнение статистики.	8	2		2		4
Применение статистики Бозе к фотонному газу.	8	2		2		4
Квантовая теория теплоемкости твердого тела.	10	3		3		4
Вырожденный Ферми-газ.	8	2		2		4
<b>Системы взаимодействующих частиц.</b>	8	2		2		4

Формула Больцмана для энтропии. Статистический вес макроскопического состояния.					
Метод Гиббса. Каноническое и микроканоническое распределение Гиббса для квантового и классического случаев.	8	2		2	4
Распределение Максвелла-Больцмана как частный случай распределения Гиббса.	8	2		2	4
Статистический и конфигурационный интегралы. Теория идеального газа. Вывод уравнения Ван-дер-Ваальса.	8	2		2	4
<b>Введение в неравновесную термодинамику и физическую кинетику.</b> Основные принципы неравновесной термодинамики: принцип линейности, принцип симметрии кинетических коэффициентов, принцип Кюри. Понятие о нелинейной термодинамике и синергетике.	8	2		2	4
Броуновское движение. Марковские процессы. Уравнение Фоккера-Планка и его простейшие приложения.	8	2		2	4
Кинетическое уравнение Больцмана, H-теорема. Кинетическое уравнение с релаксационным членом и его простейшие приложения.	8	2		2	4
<b>Статистическая физика конденсированного состояния.</b> Статистика фононного и электронного газов. Состояние электронов в кристаллической решетке.	8	2		2	4
Статистика носителей заряда. Неравновесные электроны и дырки. Рассеяния носителей заряда, проводимость, и кинетические свойства диэлектриков, металлов и полупроводников. Квазичастицы. Акустические и оптические фононы, плазмоны, экситоны Френкеля и Ванье. Конденсация бозонов. Сверхтекучесть. Электрон-фононные взаимодействия.	8	2		2	4
Полярон Фрелиха. Взаимодействие света с кристаллической решеткой, поляритоны. Оптические свойства диэлектриков, металлов и полупроводников. Поверхностные состояния электронов. Состояния электронов в структурах с пониженной размерностью.	8	2		2	4
<b>ЭКЗАМЕН</b>					27
<b>Итого</b>	252	56		56	140

### III. Образовательные технологии

Учебная программа-наименование разделов и тем	Вид занятия	Образовательные технологии
<b>Введение.</b> Предмет и методы термодинамики и статистической физики. Макроскопические системы различной природы. История развития термодинамики и статистической физики.	<i>Лекции</i>	<i>Активное слушание.</i>
<b>Основы термодинамики.</b> Основные понятия термодинамики: термодинамическая система, параметры состояния, термодинамическое равновесие. Температура.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия. Работа и теплота. Теплоемкость. Применение первого закона к идеальным системам: идеальному газу и фотонному газу. Понятие о сложных термодинамических системах.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Второй закон термодинамики. Энтропийная формулировка 2-го закона. Поток и производство энтропии.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Третий закон термодинамики. «Нулевой» закон и его роль.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Математический аппарат термодинамики: метод однородных функций Эйлера, дифференциальные формы Пфаффа, метод якобианов преобразования.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Метод характеристических функций. Термодинамика открытых систем. Химический потенциал.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Термодинамическая фаза. Фазовые переходы 1-го и 2-го рода. Условия равновесия гетерогенной системы,	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач</i>

состоящей из 2-х гомогенных фаз. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.			<i>Мозговой штурм</i>
Теория Ландау фазовых переходов 2-го рода.	<i>Лекции, занятия</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Понятие о теории зарождения новой фазы. Работа нуклеации. Критический зародыш по Гиббсу.	<i>Лекции, занятия</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
<b>Введение в статистическую физику.</b> Метод статистической физики. Основные понятия теории вероятностей. Статистические функции распределения. Усреднение. Понятие о флуктуациях.	<i>Лекции, занятия</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Классическое и квантовое уравнение Лиувилля.	<i>Лекции, занятия</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
<b>Статистическая теория идеальных систем</b> Распределение Максвелла. Распределение Максвелла-Больцмана.	<i>Лекции, занятия</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Теорема о равнораспределении энергии по степеням свободы.	<i>Лекции, занятия</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Теория теплоемкости идеального газа.	<i>Лекции, занятия</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Статистика Бозе-Эйнштейна.	<i>Лекции, занятия</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Статистика Ферми-Дирака.	<i>Лекции, занятия</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Переход к классической	<i>Лекции,</i>	<i>практические</i>	<i>Активное слушание</i>

статистике Максвелла-Больцмана. Сравнение статистики.	занятия		Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм
Применение статистики Бозе к фотонному газу.	Лекции, занятия	практические	Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм
Квантовая теория теплоемкости твердого тела.	Лекции, занятия	практические	Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм
Вырожденный Ферми-газ.	Лекции, занятия	практические	Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм
<b>Системы взаимодействующих частиц.</b> Формула Больцмана для энтропии. Статистический вес макроскопического состояния.	Лекции, занятия	практические	Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм
Метод Гиббса. Каноническое и микроканоническое распределение Гиббса для квантового и классического случаев.	Лекции, занятия	практические	Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм
Распределение Максвелла-Больцмана как частный случай распределения Гиббса.	Лекции, занятия	практические	Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм
Статистический и конфигурационный интегралы. Теория идеального газа. Вывод уравнения Ван-дер-Ваальса.	Лекции, занятия	практические	Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм
<b>Введение в неравновесную термодинамику и физическую кинетику.</b> Основные принципы неравновесной термодинамики: принцип линейности, принцип симметрии кинетических коэффициентов, принцип Кюри. Понятие о нелинейной термодинамики и синергетике.	Лекции, занятия	практические	Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм
Броуновское движение.	Лекции,	практические	Активное слушание



Марковские процессы. Уравнение Фоккера-Планка и его простейшие приложения.	<i>занятия</i>	<i>Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Кинетическое уравнение Больцмана, Н-теорема. Кинетическое уравнение с релаксационным членом и его простейшие приложения.	<i>Лекции, занятия</i> <i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
<b>7. Статистическая физика конденсированного состояния.</b> Статистика фононного и электронного газов. Состояние электронов в кристаллической решетке.	<i>Лекции, занятия</i> <i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Статистика носителей заряда. Неравновесные электроны и дырки. Рассеяния носителей заряда, проводимость, и кинетические свойства диэлектриков, металлов и полупроводников. Квазичастицы. Акустические и оптические фононы, плазмоны, экситоны Френкеля и Ванье. Конденсация бозонов. Сверхтекучесть. Электрон-фононные взаимодействия.	<i>Лекции, занятия</i> <i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>
Полярон Фрелиха. Взаимодействие света с кристаллической решеткой, поляритоны. Оптические свойства диэлектриков, металлов и полупроводников. Поверхностные состояния электронов. Состояния электронов в структурах с пониженной размерностью.	<i>Лекции, занятия</i> <i>практические</i>	<i>Активное слушание Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач Мозговой штурм</i>

#### **IV. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации**

**Форма проведения экзамена:** студенты, освоившие программу курса могут получить оценку по итогам семестровой и полусеместровой рейтинговой аттестации согласно «Положению о рейтинговой системе обучения ТвГУ» (протокол №8 от 30 апреля 2020 г.).

Если условия «Положения о рейтинговой системе ...» не выполнены, то экзамен сдается согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.)

**Для проведения текущей и промежуточной аттестации:**

**УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач:**

УК-1.1. Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие;

УК-1.2. Определяет, интерпретирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи;

УК-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки.

**Для всех индикаторов один способ аттестации.**

**Задание:**

1. Может ли понятие химического потенциала применяться к электронному газу в металлах?
  - a. Нет, поскольку электронный газ не является химическим веществом.
  - b. Да, поскольку электрон имеет массу покоя.
  - c. Да, поскольку электронный газ соответствует определению макроскопической термодинамической системы.
  - d. Нет, потому что электроны обладают волновыми свойствами.
  
2. В формуле для изменения энтропии идеального газа

$$\Delta S_{12} = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

отвечающего переходу из состояния 1 в состояние 2, перейдите в правой части от переменных  $T$  и  $V$  к переменным  $T$  и  $P$ . Здесь  $C_V$  – изохорическая

мольная теплоёмкость,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $V$  – молярный объём,  $P$  – давление.

**Способ аттестации:** письменный

**Критерии оценки:**

- **Высокий уровень (3 балла):** Понимает физику явления, составляет математические выражения для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Средний уровень (2 балла):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Низкий уровень (1 балл):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Из-за алгебраической неточности не получает правильный ответ.

**ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности:**

ОПК-1.1. Применяет базовые знания в области физико-математических наук для решения задач профессиональной деятельности.

**Задание:**

1. Возможно только три статистических ансамбля: микроканонический, канонический и большой канонический. Согласны ли вы с этим утверждением?
  - a. Да, другие ансамбли невозможны.
  - b. Нет, можно «конструировать» и иные ансамбли, например  $P, T, N$  - ансамбль.
  - c. Другие ансамбли невозможны, потому что нет других характеристических функций, с которыми эти ансамбли были бы связаны.
  - d. Возможен еще один ансамбль- $P, T, N$  -ансамбль.

2. Из общего дифференциального уравнения адиабаты

$$\left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_x dX + \gamma \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_X dx = 0$$

получите уравнение адиабаты для идеального парамагнетика. Здесь  $T$  – абсолютная температура,  $\gamma = C_X/C_x$  ( $X$  – обобщённая сила,  $x$  – сопряжённая с ней обобщённая координата).

**Способ аттестации:** письменный

**Критерии оценки:**

- **Высокий уровень (3 балла):** Понимает физику явления, составляет математические выражения для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Средний уровень (2 балла):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Низкий уровень (1 балл):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Из-за алгебраической неточности не получает правильный ответ.

**ОПК-2. Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные:**

ОПК-2.2. Проводит теоретическое изучение объектов, систем и процессов в рамках темы научного исследования.

**Задание:**

1. Покажите, что для группы аномальных веществ (например, для воды при  $t^\circ < 4^\circ\text{C}$ ), у которых удельный объём твёрдой фазы  $V\_Т$  больше удельного объёма жидкости  $V\_Ж$ , температура плавления  $T$  уменьшается с ростом давления.
2. Может ли температура плавления вещества понижаться с ростом внешнего давления?

- a. Да, для группы аномальных веществ, у которых удельный объем расплава больше, чем удельный объем кристалла.
- b. Нет, т.к. это противоречит уравнению Клапейрона-Клаузиуса.
- c. Да, и так ведет себя температура плавления всех веществ.
- d. Да, но только для простых веществ.

**Способ аттестации:** устный или письменный

**Критерии оценки:**

- **Высокий уровень (3 балла):** Понимает физику явления, составляет математические выражения для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Средний уровень (2 балла):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Низкий уровень (1 балл):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Из-за алгебраической неточности не получает правильный ответ.

## **V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### 1) Рекомендуемая литература

#### **а) основная литература:**

1. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, 1977, 552 с.  
[http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=482845&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=482845&sr=1)
2. Ансельм А.И. Основы статистической физики и термодинамики [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2007. — 448 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/692>.
3. Кондратьев А. С. , Райгородский П. А. Задачи по термодинамике, статистической физике и кинетической теории. Москва: Физматлит, 2007, 254 с. [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=68400&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=68400&sr=1)
4. Краснопевцев Е. А. Спецглавы физики: статистическая физика равновесных систем: учебное пособие. Новосибирск: НГТУ, 2014, 387 с.  
[http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=436229&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=436229&sr=1)

## **б) дополнительная литература:**

1. Новиков И.И. Термодинамика [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2009. — 592 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/286>.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 3. Молекулярная физика и термодинамика [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 224 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/706>.

### 2) Программное обеспечение

а) Лицензионное программное обеспечение

б) Свободно распространяемое программное обеспечение

3) Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1.ЭБС«ZNANIUM.COM» [www.znanium.com](http://www.znanium.com);

2.ЭБС «Университетская библиотека онлайн»<https://biblioclub.ru/>;

3.ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com>

4) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

## **VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины**

### ***1. Вопросы и задачи для проверки знаний при освоении дисциплины***

1. Для идеального газа  $p\nu = \theta$ ,  $c_v = const$  получить уравнение адиабаты  $p = p(\nu)$ .
2. Показать, что для идеального газа  $p\nu = \theta$  удельная теплоемкость  $c_p = c_v + R$
3. Определить КПД тепловой машины, работающей по циклу, состоящему из двух изотерм  $\theta = \theta_1$ ,  $\theta = \theta_2$  пересеченных двумя адиабатами.

4. Показать, что КПД теплового двигателя не может превысить КПД цикла Карно, работающего в том же диапазоне температур.
5. Для идеального газа  $pv = \theta$ ,  $c_v = const$ , получить барометрическое распределение плотности в поле силы тяжести  $U(z) = mgz$ .
6. Исходя из условия равновесия жидкости и газа  $\mu_{gas}(\theta, p) = \mu_{liq}(\theta, p)$ , получить выражение для температурного градиента  $\frac{dp}{d\theta}$  давления насыщенного пара.
7. Полагая, что давление равновесного электромагнитного излучения  $P$  равно трети плотности его энергии  $u = \frac{\varepsilon}{3}$ , получить температурную зависимость  $u = u(\theta)$ .
8. Считая  $dS = \frac{1}{\theta}(d\varepsilon + pdV)$  полным дифференциалом в переменных  $(\theta, V)$ , выразить величину  $\left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial V}\right]_{\theta}$  через уравнение состояния  $p = p(\theta, V)$ .
9. Показать, что если теплоемкость  $c_v \sim \theta^a$ , то энтропия системы имеет тот же характер зависимости от температуры.
10. Указать условия, при которых равновесное состояние системы соответствует максимальному значению энтропии.
11. Указать условия, при которых равновесное состояние системы соответствует минимальному значению свободной энергии.
12. Показать, что для равновесной классической нерелятивистской системы средняя кинетическая энергия частиц равна  $\frac{3}{2}\theta$ .
13. Определить среднее число частиц идеального классического газа, падающих за секунду на  $1 \text{ см}^2$  стенки.
14. Для вырожденного  $\theta = 0$  идеального Ферми-газа определить граничные значения импульса и энергии частиц.
15. Определить среднюю энергию гармонических колебаний, происходящих в равновесных статистических системах.

16. Для системы с фиксированным числом частиц получить оценку для дисперсии температуры  $\overline{(\Delta\theta)^2}$  при условии  $V = const$ ,  $p = const$ .

17. Для равновесной системы, находящейся в выделенной воображаемыми стенками области определить дисперсию числа частиц в системе  $\overline{(\Delta N)^2}$ , выразив ее через уравнение состояния  $p = p(\theta, V)$ .

18. Рассчитать теплоемкость идеального газа в процессе  $\frac{p}{V} = const$ .

19. Установить связь критических параметров с постоянными  $a, b$  уравнения состояния системы Ван-дер-Ваальса  $(p + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT$ .

20. Система может находиться в любом из  $N$  состояний. Вероятность того, что система находится в  $i$ -ом состоянии, равна  $p_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ), причем  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ . Применяя метод неопределенных множителей, показать, что распределение вероятности, соответствующее максимуму информационной энтропии  $S = -k \sum_i p_i \ln p_i$ , имеет вид

$$p_1 = p_2 = \dots = p_N = \frac{1}{N}$$

$$S = S_1 = k \ln N.$$

21. Одномерное нормальное (гауссово) распределения с нулевым средним значением и среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  описывается выражением

$$p(x) = (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad -\infty < x < \infty.$$

а) Показать, что для такого распределения информационная энтропия равна  $k \ln(2\pi e \sigma^2)/2$ , где  $e$  – основание натуральных логарифмов.

б) Показать, что для заданного значения  $\int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx \equiv \sigma^2$  нормированное распределение вероятности, имеющее наибольшую информационную энтропию, является одномерным нормальным распределением.

22. Система находится при фиксированных значениях химического потенциала и температуры. Показать, что логарифм большой статистической суммы для такой системы пропорционален объему.

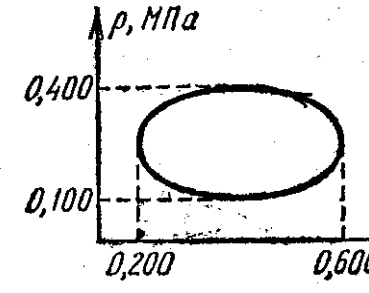
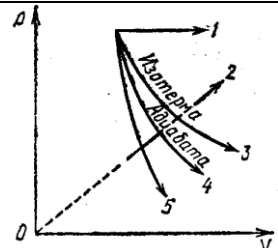


23. а) Показать, что для одной частицы массой  $m$ , движущейся классически и нерелятивистски в свободном от полей резервуаре объемом  $v$  (при  $g = 1$ ),  $Z_1 = h^{-3} v (2\pi m k T)^{3/2}$ , где  $T$  – температура этой системы.

б) Для  $n$  различных частиц, движущихся независимо, но с точечным взаимодействием, как в п. «а», в классическом случае должно быть справедливо равенство

$$Z_n = Z_1^n$$

Объяснить качественно, как изменится  $Z_n$ , если частицы являются неразличимыми.

1.	<p>В рассматриваемом интервале температур теплоемкость некоторого тела определяется функцией <math>C=10+2\cdot 10^{-2}T+3\cdot 10^{-5}T^2</math> (Дж/К). Определить количество теплоты <math>Q</math>, получаемое телом при нагревании от <math>T_1=300\text{К}</math> до <math>T_2=400\text{К}</math>.</p>
2.	<p>Круговой процесс на диаграмме <math>p, V</math> изображается эллипсом, показанным на рис. Используя данные, приведенные на рисунке, определить количество теплоты <math>Q</math>, получаемое рабочим телом за один цикл</p> 
3.	<p>Изобразить для идеального газа примерные графики изохорического, изобарического, изотермического и адиабатического процессов на диаграммах: а) <math>p, V</math>; б) <math>T, V</math>; в) <math>T, p</math>. Графики изобразить проходящими через общую для них точку.</p>
4.	<p>На рисунке изображены пять процессов, протекающих с идеальным газом. Как ведет себя внутренняя энергия газа в ходе каждого из процессов?</p> 
5.	<p>Некоторое количество идеального газа с одноатомными молекулами совершило при <math>p=1\cdot 10^5\text{Па}</math> обратимый изобарический процесс, в ходе которого объем газа изменился от значения <math>V_1=10\text{л}</math> до значения <math>V_2=20\text{л}</math>.</p> <p>Определить:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>приращение внутренней энергии газа <math>\Delta U</math>,</li> <li>совершенную газом работу <math>A</math>,</li> </ol>

	в) полученное газом количество теплоты $Q$ .
6.	<p>На рисунке приведены графики четырех различных функций распределения вероятностей значений некоторой величины <math>x</math>. Для каждого из графиков найти константу <math>A</math>, при которой оказывается нормированной. Затем вычислить <math>x</math> и <math>x^2</math>. Для случая <math>a</math> вычислить также <math>\langle  x  \rangle</math>.</p>

1. Перечень имеющихся фильмов и презентаций.

1. Ячейки Беннара (учебный фильм)

<http://www.youtube.com/watch?v=FRFqoH1Tv-g>;

2. Диффузия и ее применение (учебный фильм)

<http://rutube.ru/video/01c1b9358e696f998e466640660591a0/>;

3. Различное понимание самоорганизации и самосборки в неравновесной термодинамике и супрамолекулярной химии (презентация на кафедре теоретической физики ТвГУ);

4. Нанонаука и нанотехнология (презентация на кафедре теоретической физики ТвГУ).

## VII. Материально-техническое обеспечение

<p>Базовая учебная лаборатория общей физики. Лаборатория молекулярной физики № 211 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)</p>	<p>1. Монитор 17" LG Flatron 1751SQ-SN Silver-Black 8ms TFT TCO 03  2. Принтер лазерный HP LJ 1005 (14 стр./мин)  3. Экран настенный Screen Media 153*203(M082-08150)  4. Экран настенный Screen Media 213*213(M082-08157)  5. Компьютер (DEPO Neos 420MD WP/OF Pro AE/E4600/2*1G/DDR667/160G/D V16/FDD/KVb/Монитор LCD VenQ17  6. Компьютер  7. Установка для определения коэффициента диффузии</p>	<p>Microsoft Windows 10 Enterprise.  MS Office 365 pro plus  Kaspersky Endpoint Security для Windows  Архиватор 7-Zip - бесплатно  Acrobat Reader DC - бесплатно  Google Chrome – бесплатно  Unreal Commander - бесплатно  Почта Outlook – бесплатно  Origin 8.1 Sr2 -  договор №13918/M41 от 24.09.2009 с ЗАО «СофтЛайн Трейд»;</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p>воздуха и водяного пара ФПТ 1-4</p> <p>8 Установка для измерения теплоты парообразования ФПТ 1-10</p> <p>9 Установка для определения универсальной газовой постоянной ФПТ 1-12</p> <p>10 Установка для определения коэф. теплопроводности воздуха ФПТ 1-3</p> <p>11 Установка для определения коэффициента вязкости воздуха ФПТ 1-1</p> <p>12 Установка для определения энтропии при плавлении олова ФПТ 1-11</p> <p>13 Установка для изучения зависимости скорости звука от температуры ФПТ 1-7</p> <p>14 Установка для исследования теплоёмкости твердого тела ФПТ 1-8</p> <p>15 Компьютер iRU Corp 510 I5-2400/4096/500/G210-512/DVD-RW/W7S/монитор E-Machines E220HQVB 21.5" (2 шт)</p> <p>16 Установка для определения отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и объёме ФПТ 1-6</p> <p>17 Уравнение состояния идеального газа с применением ПК</p> <p>18 Демонстрационный набор по термодинамике</p> <p>19 Установка для формирования и измерения температур МЛИ-2</p>	
<p>Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, Лекционная аудитория</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Мультимедийный проектор Casio XJ-N2650 с потол. крепл.</li> <li>2. Экран Screen Media</li> <li>3. Ноутбук (переносной)</li> <li>4. Комплект учебной мебели на 68 посадочных мест</li> <li>5. Меловая доска</li> </ol>	<p>Microsoft Windows 10 Enterprise MS Office 365 pro plus Acrobat Reader DC - бесплатно Google Chrome – бесплатно</p>

№ 228 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)		
-------------------------------------------------------------	--	--

### **VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины**

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Реквизиты документа, утвердившего изменения
1.			
2.			