

**Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Направление подготовки/специальность: 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика**

**Наименование образовательной программы: Теплофизика**

**Уровень образования: высшее образование - бакалавриат**

**Форма обучения: Очная**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Статистическая физика**

**Москва  
2023**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Бобров В.Б.
	Идентификатор	R84cde94f-BobrovVB-6549f943

(подпись)

В.Б. Бобров

(расшифровка  
подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Яньков Г.Г.
	Идентификатор	Rbb1f0c84-YankovGG-11a2e4dc

(подпись)

Г.Г. Яньков

(расшифровка  
подписи)

Заведующий  
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Герасимов Д.Н.
	Идентификатор	Ra5495398-GerasimovDN-6b58615

(подпись)

Д.Н.

Герасимов

(расшифровка  
подписи)

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-3 Способен проводить расчеты теплофизических характеристик процессов, протекающих в конкретных технических устройствах и аппаратах энергетического оборудования

ИД-2 Владеет навыками расчета теплофизических свойств рабочих тел, используемых в энергетическом оборудовании

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Письменная работа

1. Контрольное мероприятие - 3 (Контрольная работа)

2. Контрольное мероприятие -1 (Контрольная работа)

3. Контрольное мероприятие -2 (Контрольная работа)

4. Контрольное мероприятие -4 (Контрольная работа)

## БРС дисциплины

6 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	3	7	11	14
Введение. Основы классической механики для систем многих частиц					
Основы феноменологической термодинамики			+		
Постулаты классической механики для систем многих частиц		+			
Элементы теории вероятностей					
Элементы теории вероятностей	+			+	
Основные положения классической статистической механики					
Основные положения классической статистической механики	+	+	+	+	
Основы квантовой механики для систем тождественных частиц					
Основы квантовой механики для систем тождественных частиц	+	+	+	+	

Основные положения квантовой статистической теории				
Основные положения квантовой статистической теории	+	+	+	+
Квантовые идеальные газы частиц				
Квантовые идеальные газы частиц	+		+	+
Идеальный газ частиц с внутренними степенями свободы в приближении Больцмана				
Идеальный газ частиц с внутренними степенями свободы в приближении Больцмана	+		+	
Основы статистической теории квазиклассического неидеального газа				
Основы статистической теории квазиклассического неидеального газа	+	+	+	+
Вес КМ:	15	30	30	25

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

## СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### *I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций*

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-3	ИД-2ПК-3 Владеет навыками расчета теплофизических свойств рабочих тел, используемых в энергетическом оборудовании	Знать: Основных методы вычисления термодинамических свойств веществ Основные законы классической и квантовой механики для систем многих частиц и основные постулаты статистической физики Вероятностные методы описания систем многих частиц Уметь: Применять вероятностные методы для исследования термодинамических свойств веществ Использовать основные законы классической и квантовой механики и основные постулаты статистической физики для описания	Контрольное мероприятие -1 (Контрольная работа) Контрольное мероприятие -2 (Контрольная работа) Контрольное мероприятие - 3 (Контрольная работа) Контрольное мероприятие -4 (Контрольная работа)

		термодинамических свойств веществ ;	
--	--	----------------------------------------	--

## *II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания*

### **КМ-1. Контрольное мероприятие -1**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 15

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Контрольное мероприятие – 1 (КМ-1) проводится на практическом занятии 3 учебной недели в виде письменной контрольной работы, охватывающей содержание следующих разделов курса «Статистическая физика»: Введение (основы термодинамики). Основы классической механики для систем многих частиц. Элементы теории вероятностей. Студенты в течение 1 академического часа должны письменно ответить на контрольные вопросы и задания. Контрольная работа оценивается по 5-бальной шкале. Полученная студентом по результатам выполнения письменной контрольной работы оценка является баллом текущего контроля за КМ-1.

#### **Краткое содержание задания:**

1. Сформулируйте свойство термодинамической транзитивности для равновесной системы. Какую характеристику равновесного состояния можно ввести, используя свойство термодинамической транзитивности?
2. Сформулируйте понятие термодинамического предельного перехода для равновесной системы. На какие два класса подразделяются термодинамические величины (параметры)? К какому классу величин относятся внутренняя энергия и химический потенциал равновесной системы?
3. Установите связь между давлением равновесной системы и ее термодинамическим потенциалом Гиббса.
4. Докажите справедливость основного термодинамического равенства:  $TS = E + PV - mN$ , где  $S$  – энтропия,  $E$  – средняя (внутренняя) энергия,  $P$  – давление и  $m$  – химический потенциал термодинамической системы, состоящей из  $N$  тождественных частиц в объеме  $V$  при температуре  $T$ .
5. Запишите уравнение движения для динамической переменной (функции) и получите из него уравнения Гамильтона.
6. Используя уравнение движения для динамической переменной (функции), докажите закон сохранения энергии для механической системы, находящейся во внешнем потенциальном поле.
7. Дайте определение фазового объема. Сформулируйте теорему Лиувилля для фазового объема замкнутой механической системы. Какими динамическими переменными (функциями) определяется поверхность, ограничивающая фазовый объем замкнутой системы?
8. Сформулируйте понятие плотности вероятности для непрерывной случайной величины. Дайте определения среднего значения, дисперсии и среднеквадратичного отклонения для непрерывной случайной величины.
9. Математический маятник совершает гармонические колебания по известному закону в поле силы тяжести. Найдите вероятность того, что при случайном измерении отклонения маятника на определенный угол это значение будет находиться в заданном интервале.
10. При термоэлектронной эмиссии происходит вылет электронов с поверхности металла или полупроводника. Предполагая, что а) вылеты электронов являются статистически независимыми событиями и б) вероятность вылета одного электрона за

бесконечно малый промежуток времени известна, определите вероятность вылета определенного числа электронов за определенное время.

**Контрольные вопросы/задания:**

<p>Знать: Вероятностные методы описания систем многих частиц</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1.1. Сформулируйте свойство термодинамической транзитивности для равновесной системы. Какую характеристику равновесного состояния можно ввести, используя свойство термодинамической транзитивности?</li><li>2. Сформулируйте понятие термодинамического предельного перехода для равновесной системы. На какие два класса подразделяются термодинамические величины (параметры)? К какому классу величин относятся внутренняя энергия и химический потенциал равновесной системы?</li><li>3. Запишите уравнение движения для динамической переменной (функции) и получите из него уравнения Гамильтона.</li><li>4. Дайте определение фазового объема. Сформулируйте теорему Лиувилля для фазового объема замкнутой механической системы. Какими динамическими переменными (функциями) определяется поверхность, ограничивающая фазовый объем замкнутой системы?</li><li>5. Сформулируйте понятие плотности вероятности для непрерывной случайной величины. Дайте определения среднего значения, дисперсии и среднеквадратичного отклонения для непрерывной случайной величины.</li></ol>
------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 91*

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны полные, развернутые ответы на поставленные вопросы, показана совокупность осознанных знаний по пройденным темам, доказательно раскрыты основные положения вопросов; в ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых понятий, теорий, явлений. Ответы изложены с использованием современной научной терминологии. Могут быть допущены некоторые недочеты в ответах.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 81*

*Описание характеристики выполнения знания:* Показаны знания пройденных разделов курса статистической физики почти в полном объеме (имеются пробелы знаний только в некоторых, особенно сложных разделах); даны полноценные ответы на вопросы контрольной работы; не всегда выделено наиболее существенное, но не допущено серьезных ошибок в ответах; ответы на вопросы представлены в объеме, превышающем обязательный минимум.

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 71*



*Описание характеристики выполнения знания:* Показано владение основным объемом знаний по пройденным разделам курса статистической физики; имеются затруднения в некоторых ответах, неточные формулировки; в ответах допускаются ошибки по существу вопросов. Студент владеет только обязательным минимумом в пройденных разделах курса статистической физики

## **КМ-2. Контрольное мероприятие -2**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Контрольное мероприятие – 2 (КМ-2) проводится на практическом занятии 7 учебной недели в виде письменной контрольной работы, охватывающей содержание следующих разделов курса «Статистическая физика»: Основные положения классической статистической механики. Основы квантовой механики для систем тождественных частиц. Студенты в течение 1 академического часа должны письменно ответить на контрольные вопросы и задания. Контрольная работа оценивается по 5-бальной шкале. Полученная студентом по результатам выполнения письменной контрольной работы оценка является баллом текущего контроля за КМ-2.

### **Краткое содержание задания:**

1. Найдите функцию распределения Максвелла по скоростям, если известна функция распределения Максвелла по импульсам. На этой основе определите функцию распределения по модулю скорости.
2. Дайте определение гамма – функции  $\Gamma(x)$ . Представьте для нее асимптотическое разложение Стирлинга. Вычислите значения  $\Gamma(1)$  и  $\Gamma(0,5)$ . Докажите справедливость равенства  $\Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$  и вычислите значение  $\Gamma(n)$ , где  $n$  - натуральное число.
3. Сформулируйте проблему, связанную с парадоксом Гиббса. Вычислите энтропию идеального классического газа, состоящего из  $N$  одинаковых частиц массы  $m$  в объеме  $V$  и имеющего энергию  $E$ , если величина его фазового объема известна. На этой основе найдите температуру, изохорную теплоемкость и давление идеального классического газа. Что Дж. Гиббс предложил для разрешения парадокса?
4. Используя распределение вероятности того, что абсолютная величина скорости любой частицы лежит в заданном интервале, определите средние значения модуля скорости, квадрата модуля скорости и наиболее вероятное значение абсолютной величины скорости.
5. Найдите вероятность того, что две частицы в классическом газе имеют абсолютную величину скорости относительного движения в заданном интервале. Определите среднее значение абсолютной величины скорости относительного движения.
6. Дайте определение спина микрочастицы. Каковы собственные значения оператора квадрата спина и его проекции на ось? Как определить полный момент частицы?
7. Какова связь между спином и симметрией волновой функции по отношению к парным перестановкам для системы тождественных микрочастиц? Дайте определение понятиям фермион и бозон и установите их связь со значением спина.
8. Запишите симметризованные волновые функции для двух невзаимодействующих между собой бозонов и фермионов.
9. Сформулируйте принцип Паули для невзаимодействующих и взаимодействующих фермионов. Дайте определение детерминанта Слетера и установите связь его значения с принципом Паули.
10. От каких переменных зависит волновая функция в представлении чисел заполнения? Поясните различия в значениях чисел заполнения для фермионов и бозонов.

### **Контрольные вопросы/задания:**

<p>Знать: Основные законы классической и квантовой механики для систем многих частиц и основные постулаты статистической физики</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.1. Дайте определение спина микрочастицы. Каковы собственные значения оператора квадрата спина и его проекции на ось ? Как определить полный момент частицы?</li> <li>2. Какова связь между спином и симметрией волновой функции по отношению к парным перестановкам для системы тождественных микрочастиц? Дайте определение понятиям фермион и бозон и установите их связь со значением спина.</li> <li>3. Запишите симметризованные волновые функции для двух невзаимодействующих между собой бозонов и фермионов.</li> <li>4. Сформулируйте принцип Паули для невзаимодействующих и взаимодействующих фермионов. Дайте определение детерминанта Слетера и установите связь его значения с принципом Паули.</li> <li>5. От каких переменных зависит волновая функция в представлении чисел заполнения? Поясните различия в значениях чисел заполнения для фермионов и бозонов.</li> </ol>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 91*

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны полные, развернутые ответы на поставленные вопросы, показана совокупность осознанных знаний по пройденным темам, доказательно раскрыты основные положения вопросов; в ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых понятий, теорий, явлений. Ответы изложены с использованием современной научной терминологии. Могут быть допущены некоторые недочеты в ответах.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 81*

*Описание характеристики выполнения знания:* Показаны знания пройденных разделов курса статистической физики почти в полном объеме (имеются пробелы знаний только в некоторых, особенно сложных разделах); даны полноценные ответы на вопросы контрольной работы; не всегда выделено наиболее существенное, но не допущено серьезных ошибок в ответах; ответы на вопросы представлены в объеме, превышающем обязательный минимум.

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 71*

*Описание характеристики выполнения знания:* Показано владение основным объемом знаний по пройденным разделам курса статистической физики; имеются затруднения в некоторых ответах, неточные формулировки; в ответах допускаются ошибки по существу вопросов. Студент владеет только обязательным минимумом в пройденных разделах курса статистической физики

**КМ-3. Контрольное мероприятие - 3**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

### Вес контрольного мероприятия в БРС: 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Контрольное мероприятие – 3 (КМ-3) проводится на практическом занятии 11 учебной недели в виде письменной контрольной работы, охватывающей содержание следующих разделов курса «Статистическая физика»: Основные положения квантовой статистической теории. Квантовые идеальные газы частиц. Студенты в течение 1 академического часа должны письменно ответить на контрольные вопросы и задания. Контрольная работа оценивается по 5-бальной шкале. Полученная студентом по результатам выполнения письменной контрольной работы оценка является баллом текущего контроля за КМ-3.

### Краткое содержание задания:

1. Сформулируйте принцип равных априорных вероятностей для квантовой статистики. Запишите микроканоническое распределение для замкнутой квантовой системы и выражение для ее энтропии.
2. Запишите каноническое распределение для квантовой системы и выражения для квантовой статистической суммы, энергии Гельмгольца, энтропии, давления и химического потенциала.
3. Используя каноническое распределение, определите относительную флуктуацию средней энергии квантовой системы.
4. Используя большое каноническое распределение, запишите выражение для большой статистической суммы и установите ее связь с термодинамическим потенциалом Гиббса квантовой системы.
5. Используя выражение для термодинамического потенциала Гиббса и среднего числа заполнения в идеальном квантовом газе, докажите справедливость равенства  $PV = 2E / 3$ , где  $E$  – средняя энергия квантового идеального газа, находящегося в объеме  $V$  при давлении  $P$ .
6. Каков критерий перехода к статистике Больцмана для идеального квантового газа точечных частиц? Сравните давление в идеальном газе фермионов и бозонов с давлением в квазиклассическом газе при заданной плотности и температуре.
7. Определите энергию Ферми, химический потенциал, внутреннюю энергию и давление для полностью вырожденного идеального электронного газа при заданной средней плотности.
8. Определите температуру конденсации Бозе–Эйнштейна для идеального газа бозонов с нулевым спином при заданной плотности и химический потенциал такого газа при температуре ниже температуры конденсации Бозе–Эйнштейна.
9. Определите теплоемкость вырожденного идеального электронного газа, приходящуюся на единицу объема, как функцию плотности и температуры.
10. Определите теплоемкость идеального газа бозонов с нулевым спином, приходящуюся на единицу объема, при температуре ниже температуры конденсации Бозе–Эйнштейна, учитывая, что химический потенциал равен нулю.

### Контрольные вопросы/задания:

Знать: Основных методы вычисления термодинамических свойств веществ	<ol style="list-style-type: none"><li>1.1. Сформулируйте принцип равных априорных вероятностей для квантовой статистики. Запишите микроканоническое распределение для замкнутой квантовой системы и выражение для ее энтропии.</li><li>2. Запишите каноническое распределение для квантовой системы и выражения для квантовой статистической суммы, энергии Гельмгольца, энтропии, давления и химического потенциала.</li><li>3. Используя каноническое распределение,</li></ol>
---------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p>определите относительную флуктуацию средней энергии квантовой системы.</p> <p>4. Используя большое каноническое распределение, запишите выражение для большой статистической суммы и установите ее связь с термодинамическим потенциалом Гиббса квантовой системы.</p> <p>5. Каков критерий перехода к статистике Больцмана для идеального квантового газа точечных частиц? Сравните давление в идеальном газе фермионов и бозонов с давлением в квазиклассическом газе при заданной плотности и температуре.</p>
<p>Уметь: Использовать основные законы классической и квантовой механики и основные постулаты статистической физики для описания термодинамических свойств веществ ;</p>	<p>1.1. Используя выражение для термодинамического потенциала Гиббса и среднего числа заполнения в идеальном квантовом газе, докажете справедливость равенства <math>PV = 2E / 3</math>, где <math>E</math> – средняя энергия квантового идеального газа, находящегося в объеме <math>V</math> при давлении <math>P</math>.</p> <p>2. Определите энергию Ферми, химический потенциал, внутреннюю энергию и давление для полностью вырожденного идеального электронного газа при заданной средней плотности.</p> <p>3. Определите температуру конденсации Бозе–Эйнштейна для идеального газа бозонов с нулевым спином при заданной плотности и химический потенциал такого газа при температуре ниже температуры конденсации Бозе–Эйнштейна.</p> <p>4. Определите теплоемкость вырожденного идеального электронного газа, приходящуюся на единицу объема, как функцию плотности и температуры .</p> <p>5. Определите теплоемкость идеального газа бозонов с нулевым спином, приходящуюся на единицу объема, при температуре ниже температуры конденсации Бозе–Эйнштейна, учитывая, что химический потенциал равен нулю.</p>

### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 91*

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны полные, развернутые ответы на поставленные вопросы, показана совокупность осознанных знаний по пройденным темам, доказательно раскрыты основные положения вопросов; в ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых понятий, теорий, явлений. Ответы изложены с использованием современной научной терминологии.

*Могут быть допущены некоторые недочеты в ответах.*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 81*

*Описание характеристики выполнения знания:* Показаны знания пройденных разделов курса статистической физики почти в полном объеме (имеются пробелы знаний только в некоторых, особенно сложных разделах); даны полноценные ответы на вопросы контрольной работы; не всегда выделено наиболее существенное, но не допущено серьезных ошибок в ответах; ответы на вопросы представлены в объеме, превышающем обязательный минимум.

*Оценка:* 3

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 71

*Описание характеристики выполнения знания:* Показано владение основным объемом знаний по пройденным разделам курса статистической физики; имеются затруднения в некоторых ответах, неточные формулировки; в ответах допускаются ошибки по существу вопросов. Студент владеет только обязательным минимумом в пройденных разделах курса статистической физики

#### **КМ-4. Контрольное мероприятие -4**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 25

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Контрольное мероприятие – 4 (КМ-4) проводится на практическом занятии 14 учебной недели в виде письменной контрольной работы, охватывающей содержание следующих разделов курса «Статистическая физика»: Основные положения квантовой статистической теории. Квантовые идеальные газы частиц. Студенты в течение 1 академического часа должны письменно ответить на контрольные вопросы и задания. Контрольная работа оценивается по 5-бальной шкале. Полученная студентом по результатам выполнения письменной контрольной работы оценка является баллом текущего контроля за КМ-4.

**Краткое содержание задания:**

1. Вычислите статистическую сумму для поступательных степеней свободы частицы в идеальном газе в приближении Больцмана.
2. Дайте определение понятию характеристическая температура. Каковы значения характеристических температур поступательных, электронных, колебательных и вращательных степеней свободы для молекул? При каком соотношении между температурой газа и характеристической температурой необходимо учитывать квантовые эффекты?
3. Сформулируйте модель «гармонический осциллятор – жесткий ротатор» для двухатомной молекулы. Запишите выражения для статистических сумм, отвечающих колебаниям и вращениям двухатомной молекулы в модели «гармонический осциллятор – жесткий ротатор».
4. Определите внутреннюю энергию, энтропию, давление и теплоемкость идеального газа Больцмана, состоящего из классических молекул, которые соответствуют модели «гармонический осциллятор – жесткий ротатор», а атомы имеют разные массы.
5. Дайте определение конфигурационного интеграла и установите его связь с групповыми интегралами. На этой основе запишите групповое разложение для термодинамического потенциала Гиббса. Чем отличается групповое разложение для квантовых идеальных газов от группового разложения для квазиклассического неидеального газа?
6. На основе группового разложения для термодинамического потенциала Гиббса запишите групповые разложения для давления и плотности.

7. Чем отличаются групповые и вириальные разложения для термодинамических функций? Установите связь между вторым групповым интегралом и вторым вириальным коэффициентом.
8. Какова зависимость второго вириального коэффициента от температуры? Дайте определение температуры Бойля.
9. Сформулируйте понятие термодинамического подобия. Запишите выражение для безразмерного второго вириального коэффициента с использованием модельного потенциала Леннарда-Джонса.
10. Вычислите второй вириальный коэффициент как функцию температуры для неидеального квазиклассического газа твердых сфер.

### Контрольные вопросы/задания:

<p>Уметь: Применять вероятностные методы для исследования термодинамических свойств веществ</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.1. Вычислите статистическую сумму для поступательных степеней свободы частицы в идеальном газе в приближении Больцмана.</li> <li>2. Определите внутреннюю энергию, энтропию, давление и теплоемкость идеального газа Больцмана, состоящего из классических молекул, которые соответствуют модели «гармонический осциллятор – жесткий ротатор», а атомы имеют разные массы.</li> <li>3. На основе группового разложения для термодинамического потенциала Гиббса запишите групповые разложения для давления и плотности.</li> <li>4. Чем отличаются групповые и вириальные разложения для термодинамических функций? Установите связь между вторым групповым интегралом и вторым вириальным коэффициентом.</li> <li>5. Вычислите второй вириальный коэффициент как функцию температуры для неидеального квазиклассического газа твердых сфер.</li> </ol>
-------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 91*

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны полные, развернутые ответы на поставленные вопросы, показана совокупность осознанных знаний по пройденным темам, доказательно раскрыты основные положения вопросов; в ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых понятий, теорий, явлений. Ответы изложены с использованием современной научной терминологии. Могут быть допущены некоторые недочеты в ответах.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 81*

*Описание характеристики выполнения знания:* Показаны знания пройденных разделов курса статистической физики почти в полном объеме (имеются пробелы знаний только в некоторых, особенно сложных разделах); даны полноценные ответы на вопросы контрольной работы; не всегда выделено наиболее существенное, но не допущено серьезных ошибок в ответах; ответы на вопросы представлены в объеме, превышающем обязательный минимум.

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 71*

*Описание характеристики выполнения знания:* Показано владение основным объемом знаний по пройденным разделам курса статистической физики; имеются затруднения в некоторых ответах, неточные формулировки; в ответах допускаются ошибки по существу вопросов. Студент владеет только обязательным минимумом в пройденных разделах курса статистической физики

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 6 семестр

**Форма промежуточной аттестации:** Экзамен

### Процедура проведения

Пример экзаменационного билета по курсу “Статистическая физика” 1. Термодинамические потенциалы и их полные дифференциалы. Определение термодинамических параметров (функций) с помощью термодинамических потенциалов 2. Распределение Максвелла–Больцмана. Барометрическая формула 3. Определить теплоемкость идеального газа бозонов с нулевым спином, приходящуюся на единицу объема, при температуре меньше температуры конденсации Бозе-Эйнштейна, учитывая, что химический потенциал равен нулю.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-2пк-3 Владеет навыками расчета теплофизических свойств рабочих тел, используемых в энергетическом оборудовании

### Вопросы, задания

1. Экзаменационный билет № 1

1. Предмет статистической физики. Соотношение между макроскопическим и микроскопическим уровнями описания
2. Эволюция во времени наблюдаемой величины. Представления Шредингера и Гейзенберга
3. Определите давление вырожденного идеального электронного газа как функцию плотности и температуры

2. Экзаменационный билет № 2

1. Понятие термодинамического равновесия. Начала (законы) термодинамики. Термодинамическая транзитивность для равновесной системы
2. Особенности квантовой механики для макроскопического тела
3. При термоэлектронной эмиссии происходит вылет электронов с поверхности металла или полупроводника. Предполагая, что а) вылеты электронов являются статистически независимыми событиями и б) вероятность вылета одного электрона за бесконечно малый промежуток времени известна, определите вероятность вылета электронов за определенное время

3. Экзаменационный билет № 3

1. Термодинамический предельный переход для равновесной системы. Экстенсивные и интенсивные термодинамические величины (параметры)
2. Конфигурационный интеграл квазиклассического неидеального газа. Вириальное уравнение состояния неидеального газа
3. Определите химический потенциал вырожденного идеального электронного газа как функцию плотности и температуры

4. Экзаменационный билет № 4

1. Термодинамические потенциалы и их полные дифференциалы. Определение термодинамических параметров (функций) с помощью термодинамических потенциалов
2. Распределение Максвелла–Больцмана. Барометрическая формула



3. Определить теплоемкость идеального газа бозонов с нулевым спином, приходящуюся на единицу объема, при температуре меньше температуры конденсации Бозе-Эйнштейна, учитывая, что химический потенциал равен нулю

5. Экзаменационный билет № 5

1. Принцип наименьшего действия. Функция Лагранжа. Уравнения Лагранжа. Обобщенные координаты и скорости

2. Равновесный статистический оператор. Принцип равных априорных вероятностей. Микроканоническое распределение и энтропия равновесной квантовой системы

3. Определите температурную зависимость плотности конденсата Бозе –Эйнштейна в идеальном газе бозонов с нулевым спином при заданной плотности числа частиц и температурах меньше температуры конденсации Бозе –Эйнштейна

6. Экзаменационный билет № 6

1. Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса и свойства пространства и времени

2. Матрица плотности (статистический оператор). Основной постулат квантовой статистической механики. Уравнение фон Неймана

3. Определите вклад в термодинамические функции идеального газа Больцмана от нормальных колебаний молекулы в модели «гармонический осциллятор»

7. Экзаменационный билет № 7

1. Функция Гамильтона. Уравнения Гамильтона. Зависимость динамических переменных от времени. Скобки Пуассона. Интегралы движения

2. Каноническое распределение. Квазиклассическое приближение. Энергия Гельмгольца и термодинамические функции. Флуктуации

3. Рассмотрите распределение Пуассона для числа частиц в предельном случае, когда число испытаний велико, но мало отличается от среднего значения

8. Экзаменационный билет № 8

1. Фазовое пространство. Оператор эволюции замкнутой системы. Теорема Лиувилля

2. Большое каноническое распределение.  $\Omega$ -потенциал и термодинамические функции. Флуктуации

3. Вычислите второй вириальный коэффициент как функцию температуры для неидеального квазиклассического газа частиц, потенциальная энергия взаимодействия которых имеет вид обратной степенной функции

9. Экзаменационный билет № 9

1. Понятие вероятности. Аксиоматика теории вероятностей. Дискретные случайные переменные. Среднее значение, дисперсия, матрица ковариаций

2. Вириальные коэффициенты. Термодинамическое подобие

3. Определите теплоемкость вырожденного идеального электронного газа, приходящуюся на единицу объема, как функцию плотности и температуры

10. Экзаменационный билет № 10

1. Непрерывные случайные переменные. Среднее значение, дисперсия, матрица ковариаций для непрерывных случайных переменных

2. Приближение Больцмана для статистической суммы идеального газа частиц с внутренними степенями свободы

3. Найдите вероятность того, что две частицы с различными скоростями в классическом газе имеют определенную абсолютную величину скорости относительного движения.

Определите среднее значение абсолютной величины скорости относительного движения

11. Экзаменационный билет № 11

1. Биномиальное распределение. Распределения Гаусса и Пуассона

2. Переход к статистике Больцмана. Критерий вырождения для идеальных квантовых газов

3. Определите теплоемкость идеального газа бозонов с нулевым спином, приходящуюся на единицу объема, при температуре меньше температуры конденсации Бозе – Эйнштейна, учитывая, что химический потенциал равен нулю

12. Экзаменационный билет № 12

1. Функция распределения в фазовом пространстве. Основной постулат классической статистической механики. Уравнение Лиувилля для функции распределения
2. Вырожденный идеальный газ фермионов. Энергия Ферми
3. Определите температуру Бойля для неидеального квазиклассического газа частиц, взаимодействие между которыми задается потенциалом прямоугольной потенциальной ямы

13. Экзаменационный билет № 13

1. Статистическая независимость. Аддитивные интегралы движения
2. Вырожденный идеальный газ бозонов. Конденсация Бозе – Эйнштейна
3. Найдите уравнение состояния, внутреннюю энергию и теплоемкость квазиклассического идеального газа, используя каноническое распределение Гиббса

14. Экзаменационный билет № 14

1. Принцип равных априорных вероятностей. Микроканоническое распределение для классической равновесной системы
2. Общие соотношения для термодинамических функций квантового идеального газа
3. Предполагая, что в некоторой системе распределение числа частиц во времени имеет вид распределения Пуассона, определите среднеквадратичную флуктуацию числа частиц при условии, что среднее число частиц в единицу времени известно

15. Экзаменационный билет № 15

1. Фазовый объем и термодинамические функции идеального классического газа. Парадокс Гиббса
2. Большая статистическая сумма для квантового идеального газа. Распределения Бозе – Эйнштейна и Ферми – Дирака
3. Математический маятник совершает гармонические колебания по известному закону. Найдите вероятность того, что при случайном измерении отклонения маятника на определенный угол это значение будет находиться в заданном интервале

16. Экзаменационный билет № 16

1. Функция распределения Максвелла. Распределения частиц идеального классического газа по импульсам, энергиям, модулю скорости
2. Статистические суммы в модели «гармонический осциллятор – жесткий ротатор» для двухатомной молекулы
3. Вычислите второй вириальный коэффициент как функцию температуры для неидеального квазиклассического газа твердых сфер

17. Экзаменационный билет № 17

1. Спин микрочастицы. Полная волновая функция
2. Статистическая сумма для поступательных степеней свободы частицы в идеальном газе в приближении Больцмана
3. Разреженный газ находится в сосуде при заданном давлении. Используя распределение Максвелла по скоростям, определите скорость истечения частиц газа в вакуум через небольшое отверстие с заданной площадью

18. Экзаменационный билет № 18

1. Тождественность микрочастиц. Фермионы и бозоны
2. Свободная энергия и термодинамические функции идеального газа Больцмана. Характеристические температуры для внутренних степеней свободы
3. Используя распределение Гиббса для квазиклассической системы, получите различные формы распределения Максвелла

19. Экзаменационный билет № 19

1. Полная волновая функция для системы тождественных микрочастиц. Принцип Паули

2. Силы межмолекулярного взаимодействия в разреженных газах
3. Используя распределение Максвелла для квазиклассической системы, определите средние значения целых степеней скоростей и наиболее вероятное значение абсолютной величины скорости

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Вопрос №1. Причиной возникновения макроскопических процессов в равновесной системе является ...

Ответы:

1. Причиной возникновения макроскопических процессов в равновесной системе является ...

Ответы:

- 1) Взаимодействие различных частиц системы;
- 2) Взаимодействие с окружающей средой;
- 3) Флуктуации какой либо из физических величин;
- 4) Взаимодействие атомов и молекул.

Верный ответ: 2) Взаимодействие с окружающей средой

2. Вопрос №2. Термодинамическая система – это ...

Ответы:

2. Термодинамическая система – это ...

Ответы:

- 1) Микроскопическая система;
- 2) Макроскопическая система;
- 3) Система, подчиняющаяся законам классической механики

Верный ответ: 2) Макроскопическая система

3. Вопрос №3. Энтропия как функция состояния системы зависит от независимых переменных:

Ответы:

3. Энтропия как функция состояния системы зависит от независимых переменных:

Ответы:

- 1) Температура, объем и число частиц;
- 2) Энергия, объем и число частиц;
- 3) Температура, объем и химический потенциал;
- 4) Энергия, объем и химический потенциал

Верный ответ: 2) Энергия, объем и число частиц

4. Вопрос №4. Большой термодинамический потенциал Гиббса как функция состояния системы зависит от независимых переменных:

Ответы:

4. Большой термодинамический потенциал Гиббса как функция состояния системы зависит от независимых переменных:

Ответы:

- 1) Температура, объем и число частиц;
- 2) Энергия, объем и число частиц;
- 3) Температура, объем и химический потенциал;
- 4) Энергия, объем и химический потенциал

Верный ответ: 3) Температура, объем и химический потенциал

5. Вопрос №5. Фазовым пространством называется ...

Ответы:

5. Фазовым пространством называется ...

Ответы:

- 1) Пространство фазовых состояний термодинамической системы;
- 2) Абстрактное пространство измерений, по координатным осям которого отложены обобщенные координаты и скорости частиц системы;
- 3) Абстрактное пространство измерений, по координатным осям которого отложены обобщенные координаты и обобщенные импульсы системы

Верный ответ: 3) Абстрактное пространство измерений, по координатным осям которого отложены обобщенные координаты и обобщенные импульсы системы

6. Вопрос №6. Выберите неправильное утверждение:

Ответы:

6. Выберите неправильное утверждение:

Ответы:

- 1) Закон сохранения энергии вытекает из однородности времени;
- 2) Закон сохранения импульса вытекает из изотропии пространства;
- 3) Закон сохранения импульса вытекает из однородности пространства

Верный ответ: 2) Закон сохранения импульса вытекает из изотропии пространства

7. Вопрос №7. Фермионами являются частицы

Ответы:

7. Фермионами являются частицы

Ответы:

- 1) С целым спином;
- 2) С любым спином;
- 3) С полуцелым спином;
- 4) С положительным зарядом;
- 5) С отрицательным зарядом

Верный ответ: 3) С полуцелым спином

8. Вопрос №8. Бозонами являются частицы

Ответы:

8. Бозонами являются частицы

Ответы:

- 1) С целым спином;
- 2) С любым спином;
- 3) С полуцелым спином;
- 4) С положительным зарядом;
- 5) С отрицательным зарядом

Верный ответ: 1) С целым спином

9. Вопрос №9. Двухатомная молекула имеет ...

Ответы:

9. Двухатомная молекула имеет ...

Ответы:

- 1) Три поступательных, одну вращательную и одну колебательную степени свободы;
- 2) Три поступательных, две вращательных и одну колебательную степени свободы;
- 3) Три поступательных, две вращательных, одну колебательную и электронные степени свободы;
- 4) Две вращательные, одну колебательную и электронные степени свободы

Верный ответ: 3) Три поступательных, две вращательных, одну колебательную и электронные степени свободы

10. Вопрос №10. Химический потенциал квазиклассического идеального газа является ...

Ответы:

10. Химический потенциал квазиклассического идеального газа является ...

Ответы:

- 1) Положительной величиной;
- 2) Положительной величиной и возрастает, как первая степень температуры при её повышении;
- 3) Отрицательной величиной и возрастает с уменьшением температуры;
- 4) Отрицательной величиной и уменьшается с понижением температуры

Верный ответ: 3) Отрицательной величиной и возрастает с уменьшением температуры

11.11. Значение тепловой длины волны де Бройля ...

Ответы:

11. Значение тепловой длины волны де Бройля ...

Ответы:

- 1) Уменьшается с ростом температуры;
- 2) Растет с повышением температуры;
- 3) Не зависит от температуры

Верный ответ: 1) Уменьшается с ростом температуры

12. Вопрос №12. Состояние квантовой системы, взаимодействующей с окружением в заданных внешних условиях, описывается ...

Ответы:

12. Состояние квантовой системы, взаимодействующей с окружением в заданных внешних условиях, описывается ...

Ответы:

- 1) Совокупностью обобщённых координат и обобщённых импульсов;
- 2) Волновой функцией;
- 3) Матрицей плотности

Верный ответ: 3) Матрицей плотности

13. Вопрос №13. Конденсацией Бозе-Эйнштейна называется ...

Ответы:

13. Конденсацией Бозе-Эйнштейна называется ...

Ответы:

- 1) Превращение идеального газа бозонов в жидкость;
- 2) Скопление частиц идеального газа на основном энергетическом уровне

Верный ответ: 2) Скопление частиц идеального газа на основном энергетическом уровне

14. Вопрос №14. Каноническая статистическая сумма Гиббса как функция состояния системы зависит от независимых переменных:

Ответы:

14. Каноническая статистическая сумма Гиббса как функция состояния системы зависит от независимых переменных:

Ответы:

- 1) Температура, объем и число частиц;
- 2) Энергия, объем и число частиц;

3) Температура, объем и химический потенциал;

4) Энергия, объем и химический потенциал

Верный ответ: 1) Температура, объем и число частиц

15. Вопрос №15. Значение второго вириального коэффициента в реальном разреженном газе является...

Ответы:

15. Значение второго вириального коэффициента в реальном разреженном газе является...

Ответы:

1) Положительной величиной при температурах больше температуры Бойля;

2) Отрицательной величиной при температурах больше температуры Бойля;

3) Не зависит от температуры

Верный ответ: 1) Положительной величиной при температурах больше температуры Бойля

## **II. Описание шкалы оценивания**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 91*

*Описание характеристики выполнения знания:* Студент владеет знаниями статистической физики в полном объеме учебной программы, достаточно глубоко осмысливает квантовую механику самостоятельно, в логической последовательности и исчерпывающе отвечает на все вопросы экзаменационного билета, подчеркивает при этом самое существенное, умеет анализировать, сравнивать, классифицировать, обобщать, конкретизировать и систематизировать изученный материал, выделять в нем главное: устанавливать причинно-следственные связи; четко формирует ответы, решает задачи повышенной сложности; владеет знаниями основных принципов статистической физики.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 81*

*Описание характеристики выполнения знания:* Студент владеет знаниями статистической физики почти в полном объеме программы (имеются пробелы знаний только в некоторых, особенно сложных разделах); самостоятельно и отчасти при наводящих вопросах дает полноценные ответы на вопросы экзаменационного билета; не всегда выделяет наиболее существенное, не допускает вместе с тем серьезных ошибок в ответах; умеет решать легкие и средней тяжести задачи; умеет трактовать вопросы статистической физики в объеме, превышающем обязательный минимум.

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 71*

*Описание характеристики выполнения знания:* Студент владеет основным объемом знаний по статистической физике; проявляет затруднения в самостоятельных ответах, оперирует неточными формулировками; в процессе ответов допускаются ошибки по существу вопросов. Студент способен решать лишь наиболее легкие задачи, владеет только обязательным минимумом методов статистической физики

## **III. Правила выставления итоговой оценки по курсу**

Итоговая оценка (ИО) по курсу "Статистическая физика" выставляется на основании семестровой и экзаменационной составляющей и определяется как средневзвешенное значение следующих величин — балла текущего контроля (БТК) и оценки на экзамене (ОЭ):  
$$ИО = 0,4 * БТК + 0,6 * ОЭ.$$