

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

|                            |   |
|----------------------------|---|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>  |
| <b>по дисциплине:</b>      | Статистическая физика   |
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика  |
| <b>профиль подготовки:</b> | Радиотехника и компьютерные технологии<br>Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий<br>кафедра теоретической физики |
| <b>курс:</b>               | 4   |
| <b>квалификация:</b>       | бакалавр  |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составили:

А.В. Михеенков, д-р физ.-мат. наук, доцент по кафедре, профессор

Е.В. Суровцев, канд. физ.-мат. наук, доцент

И.Я. Полищук, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор

Ю.В. Михайлова, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

Л.Б. Дубовский, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

А.А. Пухов, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической физики 23.05.2020

## Аннотация

В настоящее время методы статистической физике активно используются в различных областях естествознания. К этим областям относятся, в первую очередь, физика и химия. Однако многие научные достижения в биологии и медицине также используют базовые принципы статистической физики. Важность изучения этого предмета связана также с тем, что многие положения статистического подхода к исследованию различных явлений используются современной экономикой и социологией.

Условно курс можно разделить на две части.

В первой части излагаются основы термодинамики и статистической физики. При этом изложение основано на методе различных статистических ансамблей. Это позволяет единым образом описывать равновесные свойства различных физических систем как в термодинамическом пределе (бесконечные системы), так и флуктуации в них. В качестве иллюстрации метода используются различные модели многочастичных систем, в которых частицы не взаимодействуют между собой.

Во второй части курса исследуются физические системы, в которых взаимодействием пренебречь нельзя. Основной целью этой части курса является изложение методов, которые позволяют свести задачу к ансамблю невзаимодействующих квазичастиц (фононы в кристаллах и слабонеидеальном сверхтекучем Бозе-газе, щелевые возбуждения в Ферми-газе с притяжением). (При этом, существенно используются знания, полученные студентами в курсах теории поля и квантовой механики.)

Наряду с этим, на основе общих принципов, изучаемых в первой части курса, излагается современный подход к исследованию критических явлений, основанный на функционале Гинзбурга-Ландау. Ввиду прикладного значения для современной физической химии и биологии часть лекционного материала и семинарских занятий посвящена изучению статистических и термодинамических свойств идеальных и неидеальных растворов.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Дать студентам знания, необходимые для описания различных физических явлений в области приложений как классической, так и квантовой статистической физики, и методы построения соответствующих математических моделей. Показать соответствие системы постулатов, положенных в основу статистической физики, существующим экспериментальным данным, что позволяет считать теорию достоверной в области её применимости. Дать навыки, позволяющие понять адекватность теоретической модели соответствующему физическому явлению и определить пределы её применимости.

### Задачи дисциплины

- Изучение математического аппарата как классической, так и квантовой статистической физики;
- изучение методов решения задач как классической, так и квантовой статистической физики;
- изучение методов описания макроскопических систем частиц и их термодинамических свойств, в том числе систем, взаимодействующих с внешними полями;
- овладение студентами методов классической и квантовой статистической физики для описания свойств различных конкретных физических систем.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции   | Индикаторы достижения компетенции   |
|--|---|
| ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности | ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения                |
|  | ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки |
|  | ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов                     |

|   |  |
|---|--|
| ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования | ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики  |
|   | ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента |

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- Постулаты и принципы как классической, так и квантовой статистической физики, методы описания макроскопических систем частиц различной природы, а также постулаты термодинамики;
- основные уравнения термодинамики и свойства термодинамических потенциалов;
- основные методы математического аппарата систем многих частиц, формализм чисел заполнения (метод вторичного квантования), аппарат статистического усреднения операторов;
- основные методы решения задач как классической, так и квантовой статистической физики, включая анализ термодинамических свойств и поведения макроскопических систем во внешних полях;
- методы и способы описания конденсированного состояния вещества;
- методы описания низкотемпературных свойств сильновзаимодействующих систем.

уметь:

- Пользоваться аппаратом якобианов в приложении к термодинамике;
- пользоваться аппаратом теории вероятностей;
- пользоваться аппаратом вероятностных функций распределения;
- решать термодинамические задачи с учетом внешних полей;
- решать задачи о поведении макроскопических систем в заданном внешнем поле;
- применять метод теории среднего поля для решения задач о фазовых переходах второго рода;
- решать задачи про флуктуации термодинамических величин макроскопических систем;
- решать задачи про флуктуации параметра порядка сильновзаимодействующих систем.

владеть:

- Основными методами математического аппарата как классической, так и квантовой статистической физики;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных как со свойствами макроскопических систем различной природы, так и с их термодинамическими свойствами.

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

| №  | Тема (раздел) дисциплины          | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. |          |                 |                |
|----|-----------------------------------|---|----------|-----------------|----------------|
|    |                                   | Лекции  | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1  | Бозе-газ                          | 2   | 2        |                 | 3              |
| 2  | Информационная энтропия           | 2   | 2        |                 | 4              |
| 3  | Канонический ансамбль             | 4   | 4        |                 | 3              |
| 4  | Классический (больцмановский) газ | 2   | 2        |                 | 3              |
| 5  | Микроканонический ансамбль        | 2   | 2        |                 | 4              |
| 6  | Принципы термодинамики            | 2   | 2        |                 | 3              |
| 7  | Сверхпроводимость                 | 2   | 2        |                 | 4              |
| 8  | Сверхтекучесть                    | 2   | 2        |                 | 4              |
| 9  | Фазовые переходы                  | 2   | 2        |                 | 3              |
| 10 | Фазовые переходы II рода          | 4   | 4        |                 | 4              |

|                       |                              |                     |    |  |    |
|-----------------------|------------------------------|---------------------|----|--|----|
| 11                    | Ферми-газ                    | 2                   | 2  |  | 3  |
| 12                    | Ферромагнетизм               | 2                   | 2  |  | 4  |
| 13                    | Флуктуации параметра порядка | 2                   | 2  |  | 3  |
| Итого часов           |                              | 30                  | 30 |  | 45 |
| Подготовка к экзамену |                              | 30 час.             |    |  |    |
| Общая трудоёмкость    |                              | 135 час., 3 зач.ед. |    |  |    |

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 8 (Весенний)

##### 1. Бозе-газ

Идеальный бозе-газ. Бозе-конденсация, теплоемкость, уравнение состояния бозе-газа. Концепция квазичастиц. Фотоны и фононы. Химический потенциал, давление и теплоемкость черного излучения и твердого тела

##### 2. Информационная энтропия

Информационная энтропия Гиббса. О законе возрастания энтропии как потере информации. Теорема Нернста. Представление чисел заполнения. Вторичное квантование бозе- и ферми-газа. Гамильтонианы идеальных газов в представлении чисел заполнения.

##### 3. Канонический ансамбль

Распределение Гиббса (канонический ансамбль). Эквивалентность канонического и микроканонического распределений в термодинамическом пределе. Флуктуация энергии в ансамбле Гиббса. Статистическая сумма. Основная формула статистической физики.

##### 4. Классический (больцмановский) газ

Больцмановский газ, вычисление его термодинамических величин. Ионизация и диссоциация. Большой канонический ансамбль. Температура вырождения.

##### 5. Микроканонический ансамбль

Макроскопические системы. Средние значения. Эргодическая гипотеза. Статистическая независимость и закон больших чисел. Термодинамический предел. Число состояний, плотность числа состояний. Статистическая энтропия Больцмана. Функция распределения и матрица плотности. Уравнение Лиувилля.

##### 6. Принципы термодинамики

Замкнутые системы. Термодинамические величины. Температура. Термодинамическое равновесие. Энтропия. Неравновесная энтропия и второй закон термодинамики. Термодинамические тождества и неравенства. Принцип минимальности термодинамических потенциалов. Термодинамические потенциалы в магнитном поле. Термодинамические флуктуации. Принцип Больцмана.

##### 7. Сверхпроводимость

Микроскопическая теория сверхпроводимости неидеального ферми-газа. Гамильтониан БКШ. Неустойчивость Купера. Энергетическая щель. Термодинамика сверхпроводника, скачок теплоемкости. Теория Гинзбурга-Ландау. Сверхпроводящий ток. Уравнение Лондонов. Эффект Мейсснера. Сверхпроводники I и II рода. Вихри Абрикосова. Верхнее и нижнее критические магнитные поля. Квантование магнитного потока. Эффект Джозефсона.

#### 8. Сверхтекучесть

Микроскопическая теория сверхтекучести неидеального бозе-газа. Преобразование Боголюбова. Элементарные возбуждения. Критерий сверхтекучести Ландау.

#### 9. Фазовые переходы

Условия равновесия фаз. Химическое равновесие. Формула Саха. Фазовые переходы I и II рода. Изменение симметрии фазы. Параметр порядка.

#### 10. Фазовые переходы II рода

Теория фазовых переходов II рода (теория «среднего поля») в применении к ферромагнетику и сверхпроводнику.

#### 11. Ферми-газ

Идеальный ферми-газ. Химический потенциал, давление и теплоемкость электронов в металле. Парамагнетизм Паули. Диамагнетизм Ландау. Эффект де Гааза-ван Альфена.

#### 12. Ферромагнетизм

Микроскопическая теория ферромагнетизма в приближении самосогласованного поля. Гамильтониан Гейзенберга. Магноны. Закон Блоха.

#### 13. Флуктуации параметра порядка

Флуктуации параметра порядка и корреляционная длина. Флуктуационная теплоемкость. Критерий применимости теории «среднего поля». Масштабная инвариантность. Критические индексы.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Стандартная аудитория, желательно, с мультимедийным проектором.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 5, Ч. 1 : Статистическая физика : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 5-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2005, 2010 .— 616 с.
2. Лекции по статистической физике [Текст] : учеб. пособие для вузов / Л. А. Максимов, А. В. Михеенков, И. Я. Полищук ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2011 .— 328 с.
5. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика [Текст]. В 10 т. Т. 9, Ч. 2. Статистическая физика. Теория конденсированного состояния : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - М. : Физматлит, 2000-2005. - 496 с.

#### Дополнительная литература

**7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Ссылка страницы кафедры на официальном сайте университета  
[http://mipt.ru/education/chair/theoretical\\_physics//](http://mipt.ru/education/chair/theoretical_physics//)

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Индивидуальная работа предполагает самостоятельное выполнение студентом определенного в «Задании» набора упражнений и задач в соответствии с тематикой семинарских занятий. При необходимости студент получает консультацию по выполнению отдельных задач у преподавателя ведущего занятия как во время проведения семинарских занятий, так и во внеурочное время по согласованию с преподавателем. «Задание» раздается всем студентам в виде учебно-методического материала, содержащего программу курса и упражнения, и задачи, включенные в два домашних задания. Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем или вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

Экзамен проводится в устной форме. Экзаменационные билеты могут содержать наряду с теоретическими вопросами, также и типовые задачи. Форма билета определяется лектором и зависит от лекционного потока.

Традиционная форма билета содержит 2 теоретических вопроса и одну типовую задачу. Ответ студента оценивается по 10-балльной шкале.

Билеты также могут состоять из 3 – 5 относительно простых вопросов и вопроса (вопросов) повышенной сложности. Простые вопросы оценивают уровень знаний. Сложные вопросы оценивают уровень умений и навыков.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика  |
| <b>профиль подготовки:</b> | Радиотехника и компьютерные технологии<br>Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий<br>кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау |
| <b>курс:</b>               | 4   |
| <b>квалификация:</b>       | бакалавр  |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен

**Разработчики:**

А.В. Михеенков, д-р физ.-мат. наук, доцент по кафедре, профессор  
Е.В. Суровцев, канд. физ.-мат. наук, доцент  
И.Я. Полищук, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор  
Ю.В. Михайлова, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент  
Л.Б. Дубовский, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент  
А.А. Пухов, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции   | Индикаторы достижения компетенции  |
|--|--|
| ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности | ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения   |
|  | ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки                                |
|  | ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов  |
| ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования            | ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики  |
|  | ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Статистическая физика» обучающийся должен:

### знать:

- Постулаты и принципы как классической, так и квантовой статистической физики, методы описания макроскопических систем частиц различной природы, а также постулаты термодинамики;
- основные уравнения термодинамики и свойства термодинамических потенциалов;
- основные методы математического аппарата систем многих частиц, формализм чисел заполнения (метод вторичного квантования), аппарат статистического усреднения операторов;
- основные методы решения задач как классической, так и квантовой статистической физики, включая анализ термодинамических свойств и поведения макроскопических систем во внешних полях;
- методы и способы описания конденсированного состояния вещества;
- методы описания низкотемпературных свойств сильновзаимодействующих систем.

### уметь:

- Пользоваться аппаратом якобианов в приложении к термодинамике;
- пользоваться аппаратом теории вероятностей;
- пользоваться аппаратом вероятностных функций распределения;
- решать термодинамические задачи с учетом внешних полей;
- решать задачи о поведении макроскопических систем в заданном внешнем поле;
- применять метод теории среднего поля для решения задач о фазовых переходах второго рода;
- решать задачи про флуктуации термодинамических величин макроскопических систем;
- решать задачи про флуктуации параметра порядка сильновзаимодействующих систем.

### владеть:

- Основными методами математического аппарата как классической, так и квантовой статистической физики;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных как со свойствами макроскопических систем различной природы, так и с их термодинамическими свойствами.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю



### 3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Допуск к экзамену проводится преподавателем по итогам работы студента в семестре в случае успешного освоения дисциплины. В случае если студент не усвоил дисциплину, и результаты его работы в семестре оказались неудовлетворительными, проводится дополнительный опрос на предмет выявления знаний. Дополнительный опрос проводится в виде тестов, содержание которых полностью соответствует содержанию тестовых опросов студентов в течение семестра.

Оценка уровня студентов для допуска к экзамену складывается из оценок трех позиций: знаний, умений и навыков.

Знания студентов оцениваются в результате проведения еженедельного опроса пройденного материала. Опрос проводится в письменной форме в виде тестовых вопросов. Пример тестовых вопросов приведен ниже.

Умения и навыки студентов определяются по итогам сдачи домашних заданий. Всего студентам предлагается два домашних задания. Задание содержит три типа задач и упражнений. Типовые задачи и упражнения разбираются на семинарских (практических) занятиях. Аналогичные задачи и упражнения студенты должны решить самостоятельно, используя рекомендованную литературу. Кроме того, студентам предлагаются специально помеченные задачи повышенной сложности. Решение таких задач требует от студента навыков и представляет собой оценку навыков решения задач повышенной сложности.

Навыки студентов проверяются в результате решения контрольных работ, которые проводятся во время аудиторных занятий. Задачи аналогичны типовым задачам, включенным в домашние задания, как рассматриваемым на семинарских (практических) занятиях, так и предлагаемым для самостоятельного решения. Задания контрольных работ оценены в определенную сумму баллов, что позволяет оценить уровень умения и навыков студентов.

Вопросы, включенные в тестовые опросы, охватывают основные понятия, рассмотренные на предыдущей лекции.

Пример вопросов тестового задания:

1. Запишите критерий Ландау сверхтекучести квантовой жидкости со спектром возбуждений  $\varepsilon(p)$ .
2. Для воды из-под крана критерий сверхтекучести ( $v < v_c$ ) выполнен, почему же она не сверхтекуча?
3. Запишите выражение для гамильтониана системы тождественных взаимодействующих частиц в представлении вторичного квантования для большого канонического ансамбля  $(T, V, \mu)$ .
4. Запишите преобразования Боголюбова, связывающего операторы  $\hat{a}_p$  и  $\hat{b}_p$  и их э.с.
5. Запишите выражение для скорости боголюбовского звука  $c$ .
6. Запишите выражение для спектра возбуждений  $\varepsilon(p)$  в слабонеидеальном вырожденном бозе-газе.
7. Что больше: фазовая скорость фонона в слабонеидеальном бозе-газе или гидродинамическая скорость боголюбовского звука в нем?
8. Как зависит от константы взаимодействия  $U_0$  число надконденсатных частиц  $N - N_0$  при нулевой температуре?

9. Как зависит от температуры  $T$  теплоемкость сверхтекучей жидкости  $C_V$ ?
10. Как зависит от температуры  $T$  плотность нормальной компоненты  $\rho_n$  сверхтекучей жидкости?

Пример контрольной работы:

1. Определить коэффициент теплового расширения, заданный в переменных  $(P, T)$ , с помощью уравнения ван-дер-Ваальса, записанного в виде  $P=f(V/N, T)$ .
2. Система представляет собой ячейки адсорбционных центров. В каждой ячейке находится протон либо без электрона, – с энергией равной нулю, либо с одним электроном, с проекцией спина, равной  $\pm 1/2$ , и с энергией равной  $\varepsilon$ . Определить зависимость энтропии системы  $S$  от полной энергии  $E$ .
3. Определить низкотемпературное поведение химического потенциала и теплоемкости одномерного ультрарелятивистского бозе-газа
4. Рассмотреть  $u$ - $v$  преобразование Боголюбова в пределе длинных волн и вычислить температурную поправку к числу надконденсатных ультрарелятивистских частиц в двумерном неидеальном Бозе-газе.
5. Определить спиновый магнитный момент и спиновую магнитную восприимчивость сверхпроводника, помещенного во внешнее магнитное поле  $H$ .

Каждая задача контрольной работы оценена в определенную сумму баллов в зависимости от сложности и уровня (знания, умения и навыки). Полная сумма баллов примера контрольной работы равна 25.

Конкретные условия набора баллов за работу в семестре могут зависеть от лекционного потока и определяются лектором. Общим остается следующее правило.

В течение семестра студент набирает сумму баллов по результатам тестовых опросов (например, 50 баллов), по результатам сдачи двух заданий (например, 80 баллов) и по результатам двух контрольных (например, 100 баллов). Кроме того, за решение задач повышенной сложности домашнего задания студент может набрать премиальные (бонусные) баллы по двум заданиям (например, 30 баллов). Полный балл оценивается в данном случае суммой 230 баллов. По результатам итогового рейтинга студент может набрать некоторую сумму, которая оценивается в % относительно полного балла.

Оценка за работу в семестре выставляется в соответствии со схемой, приведенной в следующем разделе. Студент допускается к экзамену при условии сдачи двух заданий и оценки за работу в семестре равной или большей 3 (по десятибалльной шкале).

Итоговая экзаменационная оценка выставляется студенту с учетом оценки его работы в семестре. Экзамен проводится в устной форме. Экзаменационные билеты могут содержать наряду с теоретическими вопросами также и задачи. Форма билета определяется лектором и зависит от лекционного потока. Типовые задачи могут даваться также и в форме дополнительных вопросов к билету. Ответ студента оценивается по 10-балльной шкале.

Типичная форма билета содержит 3 теоретических вопроса разного уровня сложности. Пример типичной формы билета из трех вопросов приведен ниже:

1. Вычислите химпотенциал  $\mu$  и энергию  $E$  идеального нерелятивистского ферми-газа в вырожденном состоянии ( $T \ll \varepsilon_F$ ) с точностью  $\propto (T/\varepsilon_F)^2$  включительно.

Воспользуйтесь разложением 
$$\int_0^\infty \frac{f(\varepsilon)d\varepsilon}{\exp(\varepsilon - \mu)/T + 1} = \int_0^\mu f(\varepsilon)d\varepsilon + \frac{\pi^2 T^2}{6} f'(\mu) + \dots$$

Вычислите теплоемкость газа  $C_V$  и выясните, при какой температуре  $C_V \propto N$ .

2. Каноническое распределение Гиббса. Статистическая сумма  $Z$  и свободная энергия  $F$ . Распределение макроскопической системы по состояниям  $\rho(E)$  и по энергии  $w(E)$ .
3. Функционал Гинзбурга – Ландау. Уравнение для комплексного параметра порядка  $\psi(\mathbf{r})$ .

#### 4. Критерии оценивания

##### 4а. Критерии оценивания (оценка за работу в семестре)

| Оценка                  | Набранные баллы   |
|-------------------------|---|
| отлично (10)            | более 90%   |
| отлично (9)             | от 80% до 90% включительно  |
| хорошо (8)              | от 70% до 80% включительно  |
| хорошо (7)              | от 60% до 70% включительно  |
| хорошо (6)              | от 50% до 60% включительно  |
| удовлетворительно (5)   | от 40% до 50% включительно  |
| удовлетворительно (4)   | от 30% до 40% включительно  |
| удовлетворительно (3)   | от 20% до 30% включительно  |
| неудовлетворительно (2) | Не получена удовлетворительная оценка в период зачетной сессии. Требуется дополнительное тестирование |

Студенты, получившие за работу в семестре к началу экзаменационной сессии оценку «неудовлетворительно» (менее 20% усвоения материала), или не сдавшие оба задания, считаются не усвоившими материал и не выполнившими задания курса, поэтому к экзамену не допускаются.

##### 4б. Критерии оценивания (экзамен)

Итоговая оценка на экзамене выставляется в соответствии со схемой:

| Оценка            | Баллы | Критерии  |
|-------------------|-------|---|
| Отлично           | 10    | 10 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 8.<br>9 баллов за экзамен и 10 баллов за работу в семестре     |
|                   | 9     | 9 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 8.  |
|                   | 8     | 8 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 6.<br>7 баллов за экзамен и более 8 баллов за работу в семестре |
| Хорошо            | 7     | 7 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 5.<br>6 баллов за экзамен и более 8 баллов за работу в семестре |
|                   | 6     | 6 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 5.<br>5 баллов за экзамен и более 7 баллов за работу в семестре |
|                   | 5     | 5 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 3.  |
| удовлетворительно | 4     | 4 балла за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 3.   |
|                   | 3     | 3 балла за экзамен и оценка за работу в семестре 3.   |

|                     |   |   |
|---------------------|---|---|
| неудовлетворительно | 2 | 2 балла за экзамен и оценка за работу в семестре 3. |
|                     | 1 | 1 балл за экзамен и оценка за работу в семестре 3.  |

### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Студенты, допущенные к экзамену, отвечают на вопросы билета, имея возможность на подготовку не менее 1 часа. Ответы представляются в письменном виде, по которым проводится устное собеседование.

Оценка за ответ на билет выставляется в соответствии со следующим критериями:

Студент, не ответивший правильно ни на один вопрос, получает оценку неудовлетворительно (1 или 2)

Студент, ответивший правильно

только на 1 вопрос, получает оценку «удовлетворительно» (3 или 4 балла), в зависимости от полноты правильного ответа и ответов на другие дополнительные вопросы;

на 2 вопроса, получает оценку «хорошо» (5, 6 или 7 баллов), в зависимости от полноты правильных ответов и ответов на другие вопросы;

на все 3 вопроса, получает 8 баллов («отлично») и возможность ответа на дополнительные вопросы повышенной сложности для получения оценки «отлично» с баллами 9 или 10.

Во время проведения экзамена студенты могут пользоваться программой дисциплины и сборниками домашних заданий. Учебной, учебно-методической и справочной литературой пользоваться во время экзамена не допускается. Во время экзамена должны быть также выключены мобильные телефоны.

Перед началом экзаменационной сессии студенты получают перечень вопросов, ответы на которые необходимо знать для успешной сдачи экзамена. Формулировки вопросов в билетах студенты узнают во время консультаций.

Студенты, получившие итоговую оценку «отлично» (10) и решившие и защитившие задачи повышенной сложности домашнего задания, могут получить дополнительные зачетные единицы по курсу.