

**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: Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике**

**Уровень образования: высшее образование - бакалавриат**

**Форма обучения: Очная**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Физика конденсированного состояния**

**Москва  
2023**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

|  |                                                    |                                |
|--|----------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» |                                |
|  | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ                       |                                |
|  | Владелец                                           | Королев П.В.                   |
|  | Идентификатор                                      | Re35b2607-KorolevPavV-75bc1496 |

П.В. Королев

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

|  |                                                    |                                 |
|--|----------------------------------------------------|---------------------------------|
|  | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» |                                 |
|  | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ                       |                                 |
|  | Владелец                                           | Дмитриев А.С.                   |
|  | Идентификатор                                      | R8d0ce031-DmitriyevAS-aaaaeae29 |

А.С.  
Дмитриев

Заведующий  
выпускающей кафедрой

|  |                                                    |                           |
|--|----------------------------------------------------|---------------------------|
|  | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» |                           |
|  | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ                       |                           |
|  | Владелец                                           | Пузина Ю.Ю.               |
|  | Идентификатор                                      | Re86e9a56-Puzina-4d2acad1 |

Ю.Ю.  
Пузина

## 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-2 Готов к расчетно-экспериментальному анализу особенностей процессов в наноразмерных системах

ИД-4 Готов анализировать процессы взаимодействия частиц на поверхности материалов и в конденсированной фазе

и включает:

для текущего контроля успеваемости:

Форма реализации: Защита задания

1. Расчет характеристик паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия на поверхностях сферических и цилиндрических нагревателей (Решение задач)

Форма реализации: Устная форма

1. Принципы физики конденсированных систем (Коллоквиум)

2. Элементы физической кинетики. Часть 1 (Коллоквиум)

3. Элементы физической кинетики. Часть 2 (Коллоквиум)

## БРС дисциплины

7 семестр

| Раздел дисциплины                                        | Веса контрольных мероприятий, % |      |      |      |      |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|                                                          | Индекс КМ:                      | КМ-1 | КМ-2 | КМ-3 | КМ-4 |
|                                                          | Срок КМ:                        | 4    | 8    | 12   | 16   |
| Элементы физической кинетики                             |                                 |      |      |      |      |
| Основные понятия и определения                           |                                 | +    | +    |      |      |
| Кинетическое уравнение Больцмана                         |                                 | +    | +    |      |      |
| Постановка задачи для уравнения Больцмана                |                                 | +    | +    |      |      |
| Основы физики сверхтекучести и процессы переноса в He-II |                                 |      |      |      |      |
| Гелий – квантовая жидкость                               |                                 |      |      |      | +    |
| Постановка задачи о расчете теплообмена в He-II          |                                 |      |      |      | +    |
| Принципы физики конденсированных систем                  |                                 |      |      |      |      |

|                                                           |    |    |    |    |
|-----------------------------------------------------------|----|----|----|----|
| Параметры конденсированного тела                          |    |    | +  |    |
| Кристаллическая решетка                                   |    |    | +  |    |
| Теплопроводность кристаллической решетки<br>(диэлектрики) |    |    | +  |    |
| Вес КМ:                                                   | 20 | 20 | 20 | 40 |

\$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-2               | ИД-4ПК-2<br>Готов анализировать процессы взаимодействия частиц на поверхности материалов и в конденсированной фазе | Знать:<br>способы расчета процессов переноса в условиях существенной неравновесности<br>основные методы описания конденсированных систем и расчета их свойств<br>Уметь:<br>выполнять расчеты тепломассопереноса в Не-П<br>выполнять расчеты тепломассопереноса в газах при любой степени термодинамической неравновесности | Элементы физической кинетики. Часть 1 (Коллоквиум)<br>Элементы физической кинетики. Часть 2 (Коллоквиум)<br>Принципы физики конденсированных систем (Коллоквиум)<br>Расчет характеристик паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия на поверхностях сферических и цилиндрических нагревателей (Решение задач) |

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

### **КМ-1. Элементы физической кинетики. Часть 1**

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Коллоквиум

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Устный опрос студентов по темам, разобранным в первой части раздела "Элементы физической кинетики"

#### **Краткое содержание задания:**

Ответьте на поставленные вопросы как можно более подробно

#### **Контрольные вопросы/задания:**

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Знать: способы расчета процессов переноса в условиях существенной неравновесности | 1.Определение функции распределения молекул газа по скоростям. Максвелловская функция распределения<br>2.Моменты функции распределения. Связь микроскопического и макроскопического уровней описания<br>3.Кинетическое уравнение Больцмана. Основные допущения при выводе. Постановка задач<br>4.Моменты интеграла столкновений<br>5.Сумматорные инварианты и инварианты столкновений<br>6.Интеграл столкновений. Его структура<br>7.Расчет моментов интеграла столкновений для максвелловских молекул |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### **Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

## КМ-2. Элементы физической кинетики. Часть 2

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Коллоквиум

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Устный опрос студентов по темам, разобранным во второй части раздела "Элементы физической кинетики"

**Краткое содержание задания:**

Ответьте на поставленные вопросы как можно более подробно

**Контрольные вопросы/задания:**

|                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Уметь: выполнять расчеты<br>теплотемассопереноса в газах при<br>любой степени<br>термодинамической<br>неравновесности | 1.Методы решения кинетического уравнения<br>Больцмана<br>2.Алгоритм решения кинетического уравнения<br>Больцмана моментным методом<br>3.Аппроксимации функций распределения молекул<br>газа по скоростям при решении задач моментным<br>методом<br>4.Н-функция и Н-теорема<br>5.Решение линеаризованной одномерной<br>стационарной задачи о переконденсации моментным<br>методом. Получение выражения для плотности<br>потока массы $j$ . Его асимптотики<br>6.Потенциалы взаимодействия одноатомных молекул<br>7.Максвелловские молекулы |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

## КМ-3. Принципы физики конденсированных систем

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Коллоквиум

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Устный опрос студентов по темам, разобранным в разделе

**Краткое содержание задания:**

Ответьте на поставленные вопросы как можно более подробно

**Контрольные вопросы/задания:**

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Знать: основные методы описания конденсированных систем и расчета их свойств</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Классификация конденсированных систем. Характер связей частиц в конденсированных телах. Распределение электронного заряда</li> <li>2.Параметры конденсированных тел: параметр взаимодействия, параметры де Бройля и де Бура</li> <li>3.Статистическое описание систем многих частиц. Квантовые статистики Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака</li> <li>4.Вырожденный электронный газ. Импульс и энергия Ферми. Температура вырождения. Энергия и давление вырожденного электронного газа</li> <li>5.Термодинамика свободного электронного газа. Плотность числа состояний электронов</li> <li>6.Электронная теплоемкость кристалла</li> <li>7.Электроны в кристаллической решетке. Энергетический спектр электронов в кристалле. Запрещенные зоны энергий. Классификация твердых тел по зонной структуре</li> <li>8.Кинетическое уравнение для электронного газа</li> <li>9.Теплопроводность электронного газа в металлах</li> <li>10.Закон Видемана-Франца</li> <li>11.Электропроводность электронного газа в металлах. Вывод закона Ома</li> <li>12.Элементарные возбуждения и энергетический спектр конденсированного тела. Фононы</li> <li>13.Колебания кристаллической решетки с одним атомом в элементарной ячейке</li> <li>14.Колебания кристаллической решетки с двумя атомами в элементарной ячейке. Акустические и оптические моды</li> <li>15.Фононы. Фононный газ. Квантовая статистика фононов</li> <li>16.Теплоемкость кристаллической решетки. Законы Дюлонга-Пти и Дебая</li> <li>17.Фонноная теплопроводность</li> </ol> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач*

*Оценка: 3*



Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

#### КМ-4. Расчет характеристик паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия на поверхностях сферических и цилиндрических нагревателей

Формы реализации: Защита задания

Тип контрольного мероприятия: Решение задач

Вес контрольного мероприятия в БРС: 40

Процедура проведения контрольного мероприятия: Необходимо решить задачу, приведенную в кратком задании, в соответствии со своим вариантом  
 Ответы: № варианта  
 1  $q_w = 12311$  Вт/м<sup>2</sup> 2  $q_w = 13646$  Вт/м<sup>2</sup> 3  $\delta = 190$  мкм 4  $q_w = 51127$  Вт/м<sup>2</sup> 5  $q_w = 59762$  Вт/м<sup>2</sup> 6  $q_w = 54597$  Вт/м<sup>2</sup> 7  $\delta = 102$  мкм 8  $\delta = 415$  мкм 9  $q_w = 12269$  Вт/м<sup>2</sup>,  $Q = 0.888$  Вт/м<sup>2</sup> 10  $q_w = 12856$  Вт/м<sup>2</sup> 11  $\delta = 140$  мкм 12  $h = 20$  см 13  $\delta = 110$  мкм 14  $q_w = 38960$  Вт/м<sup>2</sup> 15  $\delta = 140$  мкм 16  $h = 20$  см 17  $q_w = 16283$  Вт/м<sup>2</sup>,  $Q = 1.841$  Вт 18  $h = 6$  см

#### Краткое содержание задания:

Плоский или цилиндрический, или сферический нагреватель, имеющий (если форма его цилиндрическая или сферическая) диаметр  $d_w$  погружен в сверхтекучий гелий (He-II) на глубину  $h$ . При подаче теплового потока плотностью  $q_w$  (или полной тепловой нагрузкой равной  $Q$ ) на поверхности нагревателя возникает пленка пара, толщина которой равна  $\delta$  (при тепловом потоке, равном восстановительному,  $\delta$  стремится к нулю). Рассматривается стационарное пленочное кипение. Температура свободной поверхности He-II –  $T_b$ . По заданным значениям параметров процесса кипения, взятым из приведенной ниже табл. 1, определите неизвестный параметр (обозначенный знаком «?»).

| № варианта | Тип нагревателя | $T_b$ , К | $d_w$ , мм | $\delta$ , мкм | $h$ , см | $q_w$ , Вт/м <sup>2</sup> | $Q$ , Вт |
|------------|-----------------|-----------|------------|----------------|----------|---------------------------|----------|
|------------|-----------------|-----------|------------|----------------|----------|---------------------------|----------|

#### Контрольные вопросы/задания:

|                                                |    |   |                |      |     |     |    |       |  |
|------------------------------------------------|----|---|----------------|------|-----|-----|----|-------|--|
| Уметь: выполнять расчеты теплопереноса в He-II | 1. | 1 | Плоский        | 2.00 | –   | 0   | 25 | ?     |  |
|                                                | 2. | 2 | Плоский        | 1.95 | –   | 0   | 50 | ?     |  |
|                                                | 3. | 3 | Цилиндрический | 1.95 | 2.0 | ?   | 20 | 69077 |  |
|                                                | 4. | 4 | Цилиндрический | 1.95 | 2.0 | 0   | 20 | ?     |  |
|                                                | 5. | 5 | Цилиндрический | 1.90 | 2.0 | 100 | 22 | ?     |  |
|                                                | 6. |   |                |      |     |     |    |       |  |

|     |                |      |     |     |    |       |     |
|-----|----------------|------|-----|-----|----|-------|-----|
| 6   | Цилиндрический | 1.90 | 3.8 | 185 | 23 | ?     |     |
| 7.  |                |      |     |     |    |       |     |
| 7   | Цилиндрический | 1.80 | 2.0 | ?   | 15 | 46015 |     |
| 8.  |                |      |     |     |    |       |     |
| 8   | Сферический    | 1.80 | 6.0 | ?   | 5  |       | 2.0 |
| 9.  |                |      |     |     |    |       |     |
| 9   | Сферический    | 1.80 | 4.8 | 515 | 3  | ?     | ?   |
| 10. |                |      |     |     |    |       |     |
| 10  | Плоский        | 1.80 | –   | 0   | 20 | ?     |     |
| 11. |                |      |     |     |    |       |     |
| 11  | Сферический    | 1.70 | 6.0 | ?   | 3  |       | 1.0 |
| 12. |                |      |     |     |    |       |     |
| 12  | Сферический    | 1.60 | 4.0 | 100 | ?  |       | 2.5 |
| 13. |                |      |     |     |    |       |     |
| 13  | Сферический    | 1.60 | 5.0 | ?   | 15 |       | 3.0 |
| 14. |                |      |     |     |    |       |     |
| 14  | Цилиндрический | 1.60 | 4.0 | 0   | 19 | ?     |     |
| 15. |                |      |     |     |    |       |     |
| 15  | Цилиндрический | 1.70 | 3.0 | ?   | 3  | 8862  |     |
| 16. |                |      |     |     |    |       |     |
| 16  | Цилиндрический | 1.90 | 2.8 | 100 | ?  | 52220 |     |
| 17. |                |      |     |     |    |       |     |
| 17  | Сферический    | 1.90 | 6.0 | 220 | 5  | ?     | ?   |
| 18. |                |      |     |     |    |       |     |
| 18  | Сферический    | 1.90 | 5.0 | 240 | ?  | 20318 | 1.6 |

#### Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено*

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 7 семестр

### Форма промежуточной аттестации: Экзамен

#### Пример билета

1. Кинетическое уравнение Больцмана. Основные допущения при выводе. Постановка задач.
2. Расчет «восстановительного» теплового потока в He-II при кипении. Физическая постановка. Математическое описание.
3. Оценить время кинетической релаксации в электронном газе внутри кристалла натрия при  $T = 295 \text{ K}$ . Удельное электрическое сопротивление натрия  $\rho_{\text{э}} = 4,84 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , плотность натрия  $\rho = 971,2 \text{ кг/м}^3$

#### Процедура проведения

Студенты по очереди вытягивают билеты, расположенные на столе текстом вниз. Записывается номер билета и время начала подготовки ответа. Через определенное время (по умолчанию час) студенты с расписанными ответами подходят к преподавателю и начинают рассказывать билет своими словами

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

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-4<sub>ПК-2</sub> Готов анализировать процессы взаимодействия частиц на поверхности материалов и в конденсированной фазе

#### Вопросы, задания

- 1.1. Кинетическое уравнение Больцмана. Основные допущения при выводе. Постановка задач.
2. Расчет «восстановительного» теплового потока в He-II при кипении. Физическая постановка. Математическое описание.
3. Оценить время кинетической релаксации в электронном газе внутри кристалла натрия при  $T = 295 \text{ K}$ . Удельное электрическое сопротивление натрия  $\rho_{\text{э}} = 4,84 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , плотность натрия  $\rho = 971,2 \text{ кг/м}^3$
- 2.1. Термомеханический и механотермический эффекты в He-II. Соотношение Лондона.
2. Электроны в кристаллической решетке. Энергетический спектр электронов в кристалле. Запрещенные зоны энергий. Классификация твердых тел по зонной структуре.
3. Сформулировать систему уравнений, позволяющую определить величину теплового потока через плоский слой разреженного газа. Состояние этого газа описывается четырехмоментным двухсторонним максвеллианом с параметрами  $n_1, n_2, T_1, T_2$ . Задача стационарная. Известны: температуры поверхностей  $T_{\text{гор}}$  и  $T_{\text{хол}}$ , расстояние между ними  $L$ , средняя плотность газа, находящегося между этими плоскостями  $\rho_{\text{ср}}$ . На поверхностях теплообмена осуществляется полная энергетическая аккомодация, т.е. при  $x=0 \quad T_1 = T_{\text{гор}}$ , при  $x=L \quad T_2 = T_{\text{хол}}$ .
- 3.1. Распространение звука в He-II. Система уравнений, описывающая это явление. Скорость 1-го и 2-го звука.
2. Теплоемкость кристаллической решетки. Законы Дюлонга-Пти и Дебая.
3. В одномерной задаче о переконденсации, описываемой четырехмоментным приближением в виде двухпоточного максвеллианом с параметрами  $n_1, n_2, T_1, T_2$ ,

необходимо определить компоненты тензора давления  $P_{yy}$  и  $P_{xy}$  для некоторой точки  $X$ , где  $n_1 = 5n_0$ ,  $n_2 = 3n_0$ ,  $T_1 = 4T_0$ ,  $T_2 = 2T_0$ .

4.1. Изменение давления и температуры в монохроматической волне 1-го и 2-го звука.

2. Фононы. Фононный газ. Квантовая статистика фононов.

3. В одномерной задаче о перекоденсации, описываемой четырехмоментным приближением в виде двухпоточного максвеллианом с параметрами  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ , необходимо определить температуру газа  $T$  для некоторой точки  $X$ , где  $n_1 = 4n_0$ ,  $n_2 = 2n_0$ ,  $T_1 = 9T_0$ ,  $T_2 = 4T_0$ .

5.1. Определение функции распределения молекул газа по скоростям. Моменты функции распределения. Связь микроскопического и макроскопического уровней описания.

2. Двухскоростная модель Л.Д. Ландау; допущения (предположения) и математическое описание.

3. Кристаллическая решетка поваренной соли – гранецентрированная кубическая.

Модель структуры хлористого натрия можно построить располагая попеременно ионы натрия и хлора в узлах простой кубической решетки. Найти расстояние между ближайшими соседними атомами. Плотность соли  $\rho = 2165 \text{ кг/м}^3$ .

Вычислить параметр де Бройля для ионов натрия и хлора при  $T = 290 \text{ К}$ . Сделать вывод о квантовой или классической природе ионов в кристалле поваренной соли.

6.1. Критические скорости в He-II.

2. Кинетическое уравнение для электронного газа. Теплопроводность электронного газа в металлах. Закон Видемана-Франца.

3. В одномерной стационарной задаче о перекоденсации состояние пара описывается двухсторонним максвелловским распределением с параметрами  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ . Получите выражение для температуры пара, описываемого такой функцией распределения. При каких условиях это выражение можно использовать для определения температуры газа в задаче о теплопереносе через слой разреженного газа?

7.1. Интеграл столкновений. Его структура. Расчет моментов интеграла столкновений для максвелловских молекул.

2. Сила взаимного трения Гортера-Меллинка. Физическая сущность. Качественный вывод выражения для силы. Расчет теплопереноса с учетом взаимного трения компонент He-II.

3. Определить энергию Ферми, температуру Ферми и давление вырожденного электронного газа в кристалле калия при температуре  $335 \text{ К}$ . Плотность калия  $\rho = 851 \text{ кг/м}^3$ .

8.1. Постановка задачи о расчете теплообмена в He-II. Режим сопротивления П.Л. Капицы.

2. Колебания кристаллической решетки с двумя атомами в элементарной ячейке. Акустические и оптические моды.

3. Сформулировать систему уравнений, позволяющую определить величину теплового потока через плоскую пленку пара гелия, разделяющую нагреватель и сверхтекучий гелий. Задача стационарная. Состояние пара описывается четырехмоментным двухсторонним максвеллианом. Известны: толщина паровой пленки  $d$ , температура межфазной поверхности He-II–пар  $T_s$ , температура поверхности нагревателя  $T_w$  (причем  $T_w \gg T_s$ ). Считается, что на этой поверхности осуществляется полная энергетическая аккомодация.

9.1. Описание стационарного теплопереноса в He-II при ламинарном движении нормальной компоненты.

2. Электропроводность электронного газа в металлах. Вывод закона Ома.

3. Получите выражение для потока энергии газа, описываемого эллипсоидальным распределением:

$$f = n \left( \frac{1}{2\pi RT} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{2\pi RT_{\perp}} \right) \exp \left\{ - \left[ \frac{(\xi_x - u)^2}{2RT} + \frac{\xi_y^2 + \xi_z^2}{2RT_{\perp}} \right] \right\}$$

При каких условиях этот поток энергии равен соответствующей величине, определенной по максвелловскому распределению?

10.1. Эксперименты с He-II, способствовавшие появлению двухскоростной модели.

Зависимость от температуры плотностей нормальной и сверхтекучей компонент.

2. Элементарные возбуждения и энергетический спектр конденсированного тела. Фононы.

3. Определите величину восстановительной тепловой нагрузки при кипении гелия II на цилиндрическом нагревателе диаметром 2 мм, расположенном горизонтально в He-II на глубине 20 см от свободной межфазной поверхности, имеющей температуру 2 К.

11.1. Вывод уравнения, описывающего стационарный теплоперенос в He-II на основе уравнений двухскоростной гидродинамики.

2. Колебания кристаллической решетки с одним атомом в элементарной ячейке.

3. Получите выражение для температуры газа, описываемого эллипсоидальным распределением:

$$f = n \left( \frac{1}{2\pi RT} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{2\pi RT_{\perp}} \right) \exp \left\{ - \left[ \frac{(\xi_x - u)^2}{2RT} + \frac{\xi_y^2 + \xi_z^2}{2RT_{\perp}} \right] \right\}$$

При каких условиях это распределение становится равновесным?

12.1. Решение линеаризованной одномерной стационарной задачи о переконденсации.

Получение выражения для плотности потока массы  $j$ . Его асимптотики.

2. Классификация конденсированных систем. Характер связей частиц в конденсированных телах. Распределение электронного заряда.

3. В качестве сверхщели в эксперименте П.Л. Капицы по исследованию термомеханического эффекта используется пористая пробка, состоящая из ста капилляров. Диаметр каждого капилляра 3 мкм, а его длина

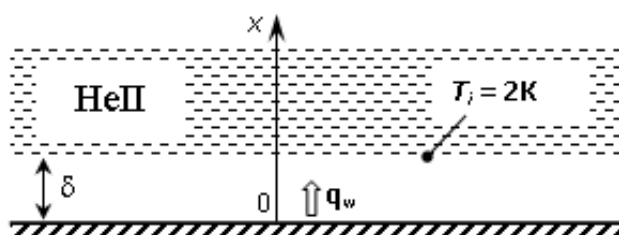
0,5 см. Разность уровней He II во внешнем и внутреннем сосудах составляет 6 см.

Источник питания создает напряжение на нагревателе, размещенном во внутреннем сосуде, величиной 0,5 В. Найдите величину тока в цепи нагревателя, обеспечивающего стационарные условия эксперимента. Теплопритоками к He II из окружающей среды пренебречь. Температура He II равняется 1,9 К.

13.1. Потенциалы взаимодействия одноатомных молекул. Максвелловские молекулы.

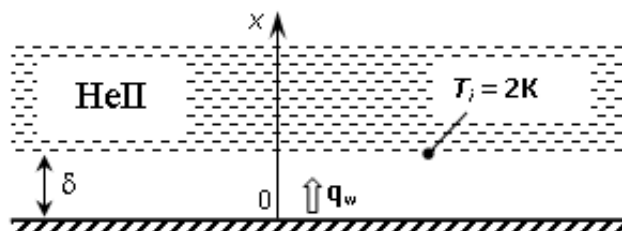
2. Параметры конденсированных тел: параметр взаимодействия, параметры де Бройля и де Бюра.

3. При стационарном бесшумовом кипении на плоском нагревателе, погруженном в гелий II на глубину  $h = 0,5$  м, образовалась паровая пленка. Толщина этой пленки  $d$  с течением времени остается постоянной. Чему равна величина удельного теплового потока, выделяемого нагревателем  $q_w$ , при которой обеспечивается поддержание заданного значения  $d$ ? Температура межфазной поверхности гелий II-пар  $T_i$  равняется 2 К. Считается, что на поверхности нагревателя осуществляется полная энергетическая аккомодация.



14.1. Методы решения кинетического уравнения Больцмана.

2. Статистическое описание систем многих частиц. Квантовые статистики Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака.
3. Определите при какой глубине погружения в гелий II плоского нагревателя на нем осуществляется стационарное бесшумовое кипение для величины удельного теплового потока, выделяемого нагревателем  $q_w = 1,8 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. При этом значении  $q_w$  обеспечивается постоянство толщины паровой пленки для искомой глубины погружения нагревателя. Температура межфазной поверхности гелий II - пар  $T_i$  равняется 2 К. Считается, что на поверхности нагревателя осуществляется полная энергетическая аккомодация.



- 15.1. Н-функция и Н-теорема.
2. Вырожденный электронный газ. Импульс и энергия Ферми. Температура вырождения. Энергия и давление вырожденного электронного газа.
3. При комнатной температуре средняя длина свободного пробега фонона в кристалле поваренной соли в четыре раза больше постоянной его решетки, которая равна 5,64 Å. Вычислить коэффициент теплопроводности этого кристалла, если плотность соли  $\rho = 2165$  кг/м<sup>3</sup> и скорость звука в кристалле  $c_{зв} = 5000$  м/с.
- 16.1. Моменты интеграла столкновений. Сумматорные инварианты и инварианты столкновений.
2. Термодинамика свободного электронного газа. Плотность числа состояний электронов. Электронная теплоемкость кристалла.
3. Сформулируйте систему уравнений для определения восстановительного теплового потока при кипении гелия II на шаровом нагревателе.
- 17.1. Методы решения кинетического уравнения Больцмана.
2. Колебания кристаллической решетки с одним атомом в элементарной ячейке.
3. Сферический нагреватель диаметром 4,8 мм погружен в сверхтекучий гелий на глубину 28 мм. При подаче тепловой нагрузки равной 0,588 Вт на поверхности нагревателя возникает пленка пара. Температура свободной поверхности 1,70 К. Оцените температурный перепад в гелии II и определите толщину паровой пленки.
- 18.1. Эксперименты с He-II, способствовавшие появлению двухскоростной модели. Зависимость от температуры плотностей нормальной и сверхтекучей компонент.
2. Термодинамика свободного электронного газа. Плотность числа состояний электронов. Электронная теплоемкость кристалла.
3. На нагревание металлического предмета массой 100 г от 20 до 50°C затрачено 8300 Дж. Определить, из какого металла изготовлен предмет, если указанный интервал температур выше характеристической температуры.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Дать классификацию конденсированных тел

Ответы:

Газ

Жидкость

Твердое тело

Сверхпроводящие тела

Конденсат Бозе-Эйнштейна

Верный ответ: Все, кроме газа

## 2. Что такое температура Дебая?

Ответы:

физическая константа вещества, характеризующая температуру, при которой возбуждаются все моды колебаний в твёрдом теле  
температура твёрдого кристаллического тела (вещества), при которой оно совершает переход в жидкое состояние  
температура, при которой не кристаллизующееся или не успевающее закристаллизоваться вещество становится твёрдым, переходя в стеклообразное состояние

Верный ответ: физическая константа вещества, характеризующая температуру, при которой возбуждаются все моды колебаний в твёрдом теле

## 3. В чем состоит физический смысл параметра де Бройля?

Ответы:

величина, описывающая вектор поляризации электромагнитных волн  
отношение длины волны де Бройля, связанной с частицами, к расстоянию между ними, определяемому межатомными силами  
безразмерное число, определяющее поведение жидкости под воздействием градиента температуры

Верный ответ: отношение длины волны де Бройля, связанной с частицами, к расстоянию между ними, определяемому межатомными силами

## 4. Что такое квазичастица?

Ответы:

стабильная отрицательно заряженная элементарная частица  
квант коллективного колебания или возмущения многочастичной системы, обладающий определённой энергией и, часто, импульсом  
неделимая часть какой-либо величины в физике

Верный ответ: квант коллективного колебания или возмущения многочастичной системы, обладающий определённой энергией и, часто, импульсом

## 5. Что такое энергетический спектр конденсированного тела?

Ответы:

совокупность всех диапазонов электромагнитного излучения в зависимости от частоты или длины волны  
набор возможных энергетических уровней квантовой системы  
набор значений масс элементарных частиц

Верный ответ: набор возможных энергетических уровней квантовой системы

## 6. Что такое фононы?

Ответы:

квазичастица, представляющая собой квант колебательного движения атомов кристалла  
фундаментальная частица, квант электромагнитного излучения  
квазичастица с целым значением спина

Верный ответ: квазичастица, представляющая собой квант колебательного движения атомов кристалла

## 7. Как закон Дебая описывает теплоемкость твердого тела?

Ответы:

допускается описательная формулировка или в виде формулы

$$C_V(T) = \frac{12\pi^4}{5} N k_B \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3$$

Верный ответ: при низких температурах теплоёмкость твёрдого тела возрастает пропорционально кубу температуры

## 8. Что такое вырожденный электронный газ?



Ответы:

материя, целиком составленная из электронов  
газ в электрическом поле  
бозонный газ

Верный ответ: материя, целиком составленная из электронов

9. Что такое энергетическая зона?

Ответы:

любое возможное состояние, в котором может находиться квантовая система  
квазинепрерывная совокупность одночастичных состояний в энергетическом спектре  
конденсированной среды  
распределение интенсивности электромагнитного излучения по частотам или по длинам волн

Верный ответ: квазинепрерывная совокупность одночастичных состояний в энергетическом спектре конденсированной среды

10. Чем обусловлена электропроводность металла?

Ответы:

переносом атомов  
переносом молекул  
переносом электронов  
переносом дырок

Верный ответ: переносом электронов

## **II. Описание шкалы оценивания**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа не выполнена или выполнена преимущественно неправильно

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

Итоговая оценка по курсу выставляется на основе оценки за промежуточную аттестацию. Возможен случай, когда в силу значительно отличающейся текущей оценки может быть применен повышающий или понижающий коэффициент