

**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

**Рабочая программа дисциплины**  
**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

<b>Блок:</b>	<b>Блок 1 «Дисциплины (модули)»</b>
<b>Часть образовательной программы:</b>	<b>Часть, формируемая участниками образовательных отношений</b>
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	<b>Б1.Ч.11</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>7 семестр - 5;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>180 часов</b>
<b>Лекции</b>	<b>7 семестр - 16 часов;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>7 семестр - 48 часа;</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>7 семестр - 2 часа;</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>7 семестр - 113,5 часов;</b>
<b>в том числе на КП/КР</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Иная контактная работа</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>включая:</b>	
<b>Коллоквиум</b>	
<b>Решение задач</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Экзамен</b>	<b>7 семестр - 0,5 часа;</b>

**Москва 2020**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

(должность)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Королев П.В.
	Идентификатор	Re35b2607-KorolevPavV-75bc149f

(подпись)

П.В. Королев

(расшифровка  
подписи)

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

(должность, ученая степень, ученое звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Дмитриев А.С.
	Идентификатор	R8d0ce031-DmitriyevAS-aaaaae2f

(подпись)

А.С. Дмитриев

(расшифровка  
подписи)

Заведующий выпускающей  
кафедры

(должность, ученая степень, ученое звание)

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

(подпись)

Ю.Ю. Пузина

(расшифровка  
подписи)

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** изучение методов описания конденсированных систем, в том числе квантовой жидкости (гелия-II), а также методов физической кинетики для описания процессов тепло- и массопереноса в идеальном газе

### Задачи дисциплины

- изучение методов описания конденсированного состояния вещества, в том числе сверхтекучего гелия, молекулярно-кинетического метода описания процессов переноса в газах (в том числе и в условиях сильной термодинамической неравновесности);
- овладение знаниями о свойствах и применении сверхтекучего гелия (гелия-II);
- приобретение навыков принятия и обоснования конкретных методических решений при выполнении расчетов различных процессов в конденсированных телах и газах.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-3 Готов к расчетно-экспериментальному анализу особенностей процессов в наноразмерных системах	ИД-4 <sub>ПК-3</sub> Готов анализировать процессы взаимодействия частиц на поверхности материалов и в конденсированной фазе	знать: - основные методы описания конденсированных систем и расчета их свойств; - способы расчета процессов переноса в условиях существенной неравновесности.  уметь: - выполнять расчеты теплопереноса в газах при любой степени термодинамической неравновесности; - выполнять расчеты теплопереноса в He-II.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике (далее – ОПОП), направления подготовки 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать Термодинамика
- знать Физика (общая)
- знать Математика
- знать Теплообмен

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания	
				Контактная работа						СР					
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль		
КПР	ГК	ИККП	ТК												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Элементы физической кинетики	36	7	8	-	8	-	-	-	-	-	20	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Элементы физической кинетики"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 7-19 [2], 3-39</p>	
1.1	Основные понятия и определения	10		2	-	2	-	-	-	-	-	6	-		
1.2	Кинетическое уравнение Больцмана	13		3	-	3	-	-	-	-	-	7	-		
1.3	Постановка задачи для уравнения Больцмана	13		3	-	3	-	-	-	-	-	7	-		
2	Основы физики сверхтекучести и процессы переноса в He-II	38		10	-	10	-	-	-	-	-	18	-		<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Основы физики сверхтекучести и процессы переноса в He-II"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 45-64</p>
2.1	Гелий – квантовая жидкость	19		5	-	5	-	-	-	-	-	9	-		
2.2	Постановка задачи о расчете теплообмена в He-II	19		5	-	5	-	-	-	-	-	9	-		
3	Принципы физики конденсированных систем	70		14	-	14	-	-	-	-	-	42	-		<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Принципы физики конденсированных систем"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 32-62 [4], 4-57, 77-115</p>
3.1	Параметры конденсированного тела	22		4	-	4	-	-	-	-	-	14	-		
3.2	Кристаллическая решетка	24		5	-	5	-	-	-	-	-	14	-		
3.3	Теплопроводность	24	5	-	5	-	-	-	-	-	14	-			

	кристаллической решетки (диэлектрики)												
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>180.0</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>80</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>180.0</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>80</b>	<b>33.5</b>	<b>113.5</b>	

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПр – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

## 3.2 Краткое содержание разделов

### 1. Элементы физической кинетики

#### 1.1. Основные понятия и определения

Потенциалы взаимодействия. Функция распределения молекул газа по скоростям. Моменты функции распределения. Связь микроскопического и макроскопического уровней описания.

#### 1.2. Кинетическое уравнение Больцмана

Основные допущения при выводе. Моменты интеграла столкновений. H-функция и H-теорема.

#### 1.3. Постановка задачи для уравнения Больцмана

Методы решения кинетического уравнения Больцмана. Решение линеаризованной одномерной стационарной задачи о переcondенсации. Получение выражения для плотности потока массы  $j$ . Его асимптотики.

### 2. Основы физики сверхтекучести и процессы переноса в He-II

#### 2.1. Гелий – квантовая жидкость

Опытные факты и наблюдения. Термомеханический и механотермический эффекты в He-II. Соотношение Лондона. Двухскоростная модель Л.Д.Ландау: допущения (предположения) и математическое описание. Распространение звука в He-II. Система уравнений, описывающая это явление. Скорость первого и второго звука. Изменение давления и температуры в монохроматической волне 1-го и 2-го звука. Третий и четвертый звуки. Коэффициент отражения звука от межфазной поверхности сверхтекучего гелия.

#### 2.2. Постановка задачи о расчете теплообмена в He-II

Режим сопротивления П.Л.Капицы. Описание стационарного теплопереноса в He-II при ламинарном движении нормальной компоненты. Вывод уравнения, описывающего стационарный теплоперенос в He-II на основе уравнений двухскоростной гидродинамики. Критические скорости в He-II. Сила взаимного трения Гортера-Меллинка. Физическая сущность. Качественный вывод выражения для силы. Расчет теплопереноса с учетом взаимного трения компонент сверхтекучего гелия. Расчет “восстановительного” теплового потока в He-II. Физическая постановка. Математическое описание. Результаты для цилиндрических нагревателей малого и большого диаметров.

### 3. Принципы физики конденсированных систем

#### 3.1. Параметры конденсированного тела

Параметр взаимодействия. Параметр де Бройля. Концепция элементарных возбуждений. Энергетический спектр конденсированного тела.

#### 3.2. Кристаллическая решетка

Коллективные колебания кристаллической решетки. Фононы. Квантовая статистика Бозе-Эйнштейна. Акустические и оптические фононы. Теплоемкость кристаллической решетки. Модель Дебая. Плавление конденсированного тела. Критерий Линдемана.

#### 3.3. Теплопроводность кристаллической решетки (диэлектрики)

Электроны в конденсированном теле. Квантовая статистика Ферми-Дирака. Вырожденный ферми газ. Теорема Блоха. Статистика и термодинамика электронов в конденсированном теле. Теплоемкость электронов. Зонная структура конденсированных тел.

### 3.3. Темы практических занятий

1. Вычисление моментов функции распределения;
2. Получение системы моментных уравнений для решения задачи об одномерной стационарной переконденсации;
3. Решение задачи о теплопереносе через плоский слой разреженного газа;
4. Решение линейризованной системы моментных уравнений для задачи об одномерной стационарной переконденсации;
5. Расчет стационарного теплопереноса в гелии II при безвихревом сверхтекучем движении и ламинарном нормальном движении;
6. Расчет стационарного теплопереноса в гелии II с учетом силы взаимного трения;
7. Определение восстановительного теплового потока при кипении сверхтекучего гелия;
8. Вывод формулы параметра де Бура. Расчет параметра де Бура для твердого  $^4\text{He}$  и других веществ в конденсированном состоянии;
9. Вывод формулы параметра де Бройля. Расчет параметра де Бройля для различных конденсированных тел;
10. Вывод формул Дебая и Дюлонга-Пти;
11. Вычисление теплоемкости кристаллической решетки различных твердых тел при различных температурах;
12. Вывод формулы электропроводности металлов;
13. Электронная теплопроводность. Вывод закона Видемана-Франца;
14. Фононная теплопроводность.

### 3.4. Темы лабораторных работ

не предусмотрено

### 3.5 Консультации

#### Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Элементы физической кинетики"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Основы физики сверхтекучести и процессы переноса в He-II"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Принципы физики конденсированных систем"

### 3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ

Курсовой проект/ работа не предусмотрены

### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)			Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	
<b>Знать:</b>					
способы расчета процессов переноса в условиях существенной неравновесности	ИД-4ПК-3	+			Коллоквиум/Элементы физической кинетики. Часть 1
основные методы описания конденсированных систем и расчета их свойств	ИД-4ПК-3			+	Коллоквиум/Принципы физики конденсированных систем
<b>Уметь:</b>					
выполнять расчеты тепломассопереноса в He-II	ИД-4ПК-3		+		Решение задач/Расчет характеристик паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия на поверхностях сферических и цилиндрических нагревателей
выполнять расчеты тепломассопереноса в газах при любой степени термодинамической неравновесности	ИД-4ПК-3	+			Коллоквиум/Элементы физической кинетики. Часть 2

## **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

**7 семестр**

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)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

*Экзамен (Семестр №7)*

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

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Королев, П. В. Методы описания конденсированных систем : учебное пособие по курсу "Физика конденсированных систем" по направлению "Нанотехнологии", и слушателей ФПКПиС МЭИ (ТУ) / П. В. Королев, А. П. Крюков, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Издательский дом МЭИ, 2010 . – 64 с. - ISBN 978-5-383-00428-9 .  
[http://elib.mpei.ru/action.php?kt\\_path\\_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=1454](http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=1454);
2. Крюков, А. П. Элементы физической кинетики : Учебное пособие по курсу "Основы криофизики" / А. П. Крюков, Моск. энерг. ин-т (МЭИ) . – М. : Изд-во МЭИ, 1995 . – 69 с. : 890.00 .;
3. Крюков, А. П. Элементы гидродинамики и теплопереноса в гелии II : Учебное пособие по курсу "Криофизика" по направлению "Техническая физика" / А. П. Крюков, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Изд-во МЭИ, 2004 . – 80 с. - ISBN 5-7046-1137-0 .;
4. Дмитриев, А. С. Основы криофизики конденсированных систем : учебное пособие по курсу "Криофизика", по направлению "Техническая физика" / А. С. Дмитриев, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Изд-во МЭИ, 2006 . – 132 с. - ISBN 5-903072-78-X ..

### **5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:**

1. Office;
2. Windows.

### 5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
3. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
4. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
5. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
6. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
7. Портал открытых данных Российской Федерации - <https://data.gov.ru>
8. База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ - <https://rosmintrud.ru/opendata>
9. База открытых данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ - <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>
10. База открытых данных Министерства экономического развития РФ - <http://www.economy.gov.ru>
11. База открытых данных Росфинмониторинга - <http://www.fedsfm.ru/opendata>
12. Электронная открытая база данных "Polpred.com Обзор СМИ" - <https://www.polpred.com>
13. Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование» - <https://openedu.ru>
14. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии - <http://protect.gost.ru/>
15. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>

### 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория	стол, стул, мультимедийный проектор

	криофизики	
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Помещения для самостоятельной работы	М-411/1, Компьютерный класс	стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, компьютер персональный
Помещения для консультирования	М-423/1, Аудитория каф. "НТ"	стул, стол письменный
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	М-407/1, Кладовая	стеллаж для хранения инвентаря, стеллаж для хранения книг, инвентарь специализированный

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

## Физика конденсированного состояния

(название дисциплины)

## 7 семестр

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

КМ-1 Элементы физической кинетики. Часть 1 (Коллоквиум)

КМ-2 Элементы физической кинетики. Часть 2 (Коллоквиум)

КМ-3 Принципы физики конденсированных систем (Коллоквиум)

КМ-4 Расчет характеристик паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия на поверхностях сферических и цилиндрических нагревателей (Решение задач)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	4	8	12	16
1	Элементы физической кинетики					
1.1	Основные понятия и определения		+	+		
1.2	Кинетическое уравнение Больцмана		+	+		
1.3	Постановка задачи для уравнения Больцмана		+	+		
2	Основы физики сверхтекучести и процессы переноса в He-II					
2.1	Гелий – квантовая жидкость					+
2.2	Постановка задачи о расчете теплообмена в He-II					+
3	Принципы физики конденсированных систем					
3.1	Параметры конденсированного тела				+	
3.2	Кристаллическая решетка				+	
3.3	Теплопроводность кристаллической решетки (диэлектрики)				+	
Вес КМ, %:			20	20	20	40