

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

---

Направление подготовки/специальность: 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Теплофизика и молекулярная физика

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**ВОЛНЫ И НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ**

<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>Б4.Ч.02</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>3 семестр - 3;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>108 часов</b>
<b>Лекции</b>	<b>3 семестр - 16 часов;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>3 семестр - 32 часа;</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>3 семестр - 59,7 часа;</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>Расчетно-графическая работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Зачет</b>	<b>3 семестр - 0,3 часа;</b>

**Москва 2024**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

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

Д.Н. Герасимов

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

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

Г.Г. Яньков

Заведующий выпускающей  
кафедрой

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

Д.Н. Герасимов

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** ознакомление с основами проблемами распространения волн в различных средах, необходимыми для практической деятельности инженеров теплофизиков, и методами экспериментального исследования систем, в которых распространение волн и генерация неустойчивостей играет важную роль

### Задачи дисциплины

- освоение технологических процессов, в которых распространение волн и генерация неустойчивостей играет важную роль;
- приобретение навыков проведения численного эксперимента в области волновых систем.

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-1 Способен анализировать и моделировать физические процессы, используемые в атомной энергетике	ИД-1ПК-1 Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок	знать: - Описание свободной конвекции в приближении Буссинеска; - Методы получения дисперсионного уравнения для волн в газах; - Описание волн малой амплитуды в сплошных средах.  уметь: - Ставить граничные условия на поверхности раздела фаз и получать уравнения поверхностных волн.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к факультативным дисциплинам основной профессиональной образовательной программе Теплофизика и молекулярная физика (далее – ОПОП), направления подготовки 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Базируется на уровне высшего образования (бакалавриат, специалитет).

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 3 зачетных единицы, 108 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	Волны малой амплитуды в газе, твердом теле и плазме	26.7	3	4	-	8	-	-	-	-	-	14.7	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Волны малой амплитуды в газе, твердом теле и плазме"</p> <p><b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> Задания ориентированы на решения минизадч по разделу "Волны малой амплитуды в газе, твердом теле и плазме". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения:</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[1], 5-60 [2], 1-92 [4], 1-92</p>	
1.1	Модели сплошных сред	13.7		2	-	4	-	-	-	-	-	7.7	-		
1.2	Волны малой амплитуды в газе, твердом теле и плазме	13		2	-	4	-	-	-	-	-	7	-		
2	Распространение слабых и сильных разрывов в газе	27		4	-	8	-	-	-	-	-	-	15		-
2.1	Распространение слабых и сильных разрывов в газе	27		4	-	8	-	-	-	-	-	-	15		-

													разрывов в газе". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 5-105
3	Конвекция в подогреваемом снизу слое жидкости	27	4	-	8	-	-	-	-	-	15	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Конвекция в подогреваемом снизу слое жидкости"
3.1	Конвекция в подогреваемом снизу слое жидкости	27	4	-	8	-	-	-	-	-	15	-	<b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> Задания ориентированы на решения минизаданий по разделу "Конвекция в подогреваемом снизу слое жидкости". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 10-25
4	Нелинейные волны в сплошных средах	27	4	-	8	-	-	-	-	-	15	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Нелинейные волны в сплошных средах"
4.1	Поверхностные гравитационно – капиллярные волны на поверхности слоя жидкости конечной и бесконечной глубины	13	2	-	4	-	-	-	-	-	7	-	<b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> Задания ориентированы на решения минизаданий по разделу "Нелинейные волны в сплошных средах". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения:
4.2	Нелинейные волны в сплошных средах	14	2	-	4	-	-	-	-	-	8	-	теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения:

													<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i>
	Зачет	0.3	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	-	[1], 1-412
	<b>Всего за семестр</b>	<b>108.0</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.3</b>	<b>59.7</b>	<b>-</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>108.0</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.3</b>	<b>59.7</b>	<b>-</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. Волны малой амплитуды в газе, твердом теле и плазме

##### 1.1. Модели сплошных сред

Дискретные и сплошные среды. Стационарные и эволюционные модели в физике и технике. Алгебраические модели. Модели, сводящиеся к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Модели, сводящиеся к дифференциальным уравнениям в частных производных. Модели, сводящиеся к интегральным уравнениям. Системы с сосредоточенными параметрами. Стационарные состояния и особые точки дифференциальных уравнений. Бифуркации решений. Нелинейные эффекты. Понятие об устойчивости стационарного состояния. Линеаризация. Методы анализа эволюции малых возмущений. Периодические процессы в системах с сосредоточенными параметрами. Уравнение Ван-дер-Поля и предельные циклы. Системы с распределенными параметрами. Стационарные состояния. Понятие об устойчивости стационарного состояния. Методы исследования устойчивости стационарных состояний. Линеаризация и анализа эволюции малых возмущений. Устойчивость стационарных состояний относительно малых возмущений. Области устойчивости и нейтральная кривая. Критерии возникновения неустойчивостей на основе анализа корней дисперсионного уравнения. Метод локального дисперсионного уравнения. Периодические процессы в сплошных средах..

##### 1.2. Волны малой амплитуды в газе, твердом теле и плазме

Различные формы записи уравнений движения и энергии. Стационарные состояния. Уравнения неразрывности, движения и энергии для малых возмущений. Линеаризация уравнений. Распространение малых возмущений в совершенном газе в безграничной среде. Дисперсионное уравнение. Типы волны в газе. Акустические волны в движущейся среде. Эффект Доплера. Волны Римана. Уравнения сплошной среды для вязкого и теплопроводного газа. Особенности распространения малых возмущений в вязком и теплопроводном газе. Дисперсионное уравнение для связанных энтропийных и акустических мод в вязком и теплопроводном газе. Дисперсионное уравнение. Влияние внешних сил и источников тепловыделения на распространение акустических колебаний в газе. Механизм генерации акустических колебаний Рэлея. Колебания и волны в твердом теле и низкотемпературной плазме. Уравнение динамики смещений в твердом теле. Феноменологическое уравнение состояния твердого тела. Вывод соотношений между тензорами напряжений и деформаций. Распространение звука в твердом теле. Продольная акустическая волна. Поперечные акустические волны. Определение местонахождения источника акустических возмущений. Основные свойства плазмы. Колебания и волны в низкотемпературной плазме. Ионизационные волны. Основные неустойчивости в низкотемпературной плазме: акустическая, перегревная, ионизационная, ионизационно-перегревная. Плазменная турбулентность. Турбулентные коэффициенты переноса..

#### 2. Распространение слабых и сильных разрывов в газе

##### 2.1. Распространение слабых и сильных разрывов в газе

Понятие о слабых и сильных разрывах. Скорости распространения слабых разрывов. Сильные разрывы. Соотношения на поверхности разрыва. Ударные и детонационные волны. Ионизирующие ударные волны в плазме. Соотношения на фронте ударной волны. Структура ударных и детонационных волн. Устойчивость ударных и детонационных волн. Волны горения и ионизации. Паводковые ударные волны в жидкости и скорости их распространения..

#### 3. Конвекция в подогреваемом снизу слое жидкости

### 3.1. Конвекция в подогреваемом снизу слое жидкости

Конвекция Рэлея – Бенара в слое. Уравнения несжимаемой жидкости в модели Буссинеска. Стационарные состояния с слое жидкости с одностороннем нагреве. Линеаризация. Дисперсионное и характеристическое уравнения. Условия возникновения тепловой конвекции в жидкости для свободной и твердой поверхностей. Валы. Ячейки Бенара. Особенности теплопереноса при наличии конвекции в жидкости. 4. Поверхностные гравитационно – капиллярные волны на поверхности слоя жидкости. Гравитационно – капиллярные волны на поверхности слоя жидкости конечной и бесконечной глубины. Линейная задача. Нелинейные волны и методы разложения решения в ряд по малым параметрам задачи. Кноидальные волны и волны Стокса. Уравнение Кортевега – де Вриза. Солитон и его свойства. Взаимодействия солитонов. Взаимодействие волн и кинетическое уравнение В.Е. Захарова. Турбулентность поверхностных волн. Спектры турбулентности..

## 4. Нелинейные волны в сплошных средах

4.1. Поверхностные гравитационно – капиллярные волны на поверхности слоя жидкости конечной и бесконечной глубины

Гравитационно – капиллярные волны на поверхности слоя жидкости конечной и бесконечной глубины. Линейная задача. Нелинейные волны и методы разложения решения в ряд по малым параметрам задачи. Кноидальные волны и волны Стокса. Уравнение Кортевега – де Вриза. Солитон и его свойства. Взаимодействия солитонов. Взаимодействие волн и кинетическое уравнение В.Е. Захарова. Турбулентность поверхностных волн. Спектры турбулентности..

4.2. Нелинейные волны в сплошных средах

Особенности распространения нелинейных волн. Уравнение Кортевега – де Вриза. Солитоны и их свойства. Уравнение Кадомцева – Петвиашвили и двумерные солитоны. Уравнение синус Гордона. Уравнение Ландау для амплитуды. Волны огибающих. Нелинейное уравнение Шредингера для амплитуды огибающей волны. Волны в полупроводниках. Эффект Ганна. Некоторые общие методы решения нелинейных уравнений в частных производных..

### 3.3. Темы практических занятий

1. Математическое описание сплошной среды.;
2. Бифуркации в физических системах.;
3. Акустические волны.;
4. Колебания и волны в плазме.;
5. Ударные и детонационные волны.;
6. Конвекция Рэлея-Бенара.;
7. Поверхностные волны.;
8. Неустойчивость поверхностных волн..

### 3.4. Темы лабораторных работ не предусмотрено

### 3.5 Консультации

Текущий контроль (ТК)



1. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Волны малой амплитуды в газе, твердом теле и плазме"
2. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Распространение слабых и сильных разрывов в газе"
3. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Конвекция в подогреваемом снизу слое жидкости"
4. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Нелинейные волны в сплошных средах"

### **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	4	
<b>Знать:</b>						
Описание волн малой амплитуды в сплошных средах	ИД-1ПК-1		+			Расчетно-графическая работа/Распространение волны ионизации
Методы получения дисперсионного уравнения для волн в газах	ИД-1ПК-1	+				Расчетно-графическая работа/Акустические волны
Описание свободной конвекции в приближении Буссинеска	ИД-1ПК-1			+		Расчетно-графическая работа/Конвекция Рэлея-Бенара
<b>Уметь:</b>						
Ставить граничные условия на поверхности раздела фаз и получать уравнения поверхностных волн	ИД-1ПК-1				+	Расчетно-графическая работа/Поверхностные волны

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

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

**3 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Акустические волны (Расчетно-графическая работа)
2. Конвекция Рэлея-Бенара (Расчетно-графическая работа)
3. Поверхностные волны (Расчетно-графическая работа)
4. Распространение волны ионизации (Расчетно-графическая работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

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

Зачет (Семестр №3)

По итогам КМ.

В диплом выставляется оценка за 3 семестр.

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

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

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

1. Артемов, В. И. Неустойчивости и турбулентность в низкотемпературной плазме / В. И. Артемов, Ю. С. Левитан, О. А. Синкевич . – М. : Изд-во МЭИ, 1994 . – 412 с. - ISBN 5-7046-0037-9 : 800.00 .;
2. Синкевич, О. А. Акустические волны в плазме и твердом теле : учебное пособие по курсам "Физика твердого тела", "Физика плазмы", "Волны и неустойчивости в сплошных средах" по направлению "Техническая физика" / О. А. Синкевич ; Ред. В. В. Глазков ; Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Издательский дом МЭИ, 2007 . – 92 с. - ISBN 978-5-383-00005-2 .;
3. Синкевич, О. А. Волны и неустойчивости в сплошных средах : учебное пособие по курсам "Волны и неустойчивости в сплошных средах", "Физика плазмы" по направлению "Техническая физика" / О. А. Синкевич, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2016 . – 264 с. - ISBN 978-5-7046-1772-3 .;
4. Синкевич О.А.- "Акустические волны в плазме и твердом теле", Издательство: "МЭИ", Москва, 2020  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383014288.html>.

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

1. Office / Российский пакет офисных программ;
2. Windows / Операционная система семейства Linux.

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

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>

2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" -

[http://biblioclub.ru/index.php?page=main\\_ub\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red)

3. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>

4. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>

#### **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

<b>Тип помещения</b>	<b>Номер аудитории, наименование</b>	<b>Оснащение</b>
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	Т-417, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Т-417, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Т-417, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Помещения для самостоятельной работы	Т-412, Учебная лаборатория вычислительной техники	стол преподавателя, стол учебный, стул, компьютерная сеть с выходом в Интернет, доска маркерная, компьютер персональный
Помещения для консультирования	Т-205, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, доска маркерная
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	Т-213, Подсобное помещение	

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Волны и неустойчивости в сплошных средах

(название дисциплины)

#### 3 семестр

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

- КМ-1 Акустические волны (Расчетно-графическая работа)
- КМ-2 Распространение волны ионизации (Расчетно-графическая работа)
- КМ-3 Конвекция Рэлея-Бенара (Расчетно-графическая работа)
- КМ-4 Поверхностные волны (Расчетно-графическая работа)

**Вид промежуточной аттестации – Зачет.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	12	13	14	15
1	Волны малой амплитуды в газе, твердом теле и плазме					
1.1	Модели сплошных сред		+			
1.2	Волны малой амплитуды в газе, твердом теле и плазме		+			
2	Распространение слабых и сильных разрывов в газе					
2.1	Распространение слабых и сильных разрывов в газе			+		
3	Конвекция в подогреваемом снизу слое жидкости					
3.1	Конвекция в подогреваемом снизу слое жидкости				+	
4	Нелинейные волны в сплошных средах					
4.1	Поверхностные гравитационно – капиллярные волны на поверхности слоя жидкости конечной и бесконечной глубины					+
4.2	Нелинейные волны в сплошных средах					+
Вес КМ, %:			25	25	25	25