

**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: Физико-технические проблемы атомной энергетики

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**ГАЗОДИНАМИКА ДВУХФАЗНЫХ СРЕД**

<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.09.01.02</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>2 семестр - 2;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>72 часа</b>
<b>Лекции</b>	<b>2 семестр - 32 часа;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</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>2 семестр - 39,7 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>Контрольная работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Зачет с оценкой</b>	<b>2 семестр - 0,3 часа;</b>

**Москва 2023**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Мелихов О.И.
	Идентификатор	Re9797a97-MelikhovOI-83f385d8

О.И. Мелихов

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Мелихов О.И.
	Идентификатор	Re9797a97-MelikhovOI-83f385d8

О.И. Мелихов

Заведующий выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Хвостова М.С.
	Идентификатор	R5ead212f-KhvastovaMS-a4cf11ca

М.С. Хвостова

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** Цель освоения дисциплины состоит в изучении закономерностей газодинамических процессов в двухфазных средах в аварийных условиях на АЭС.

### Задачи дисциплины

- Формирование начальных представлений о математическом аппарате для описания газодинамических процессов в двухфазных средах.;
- Приобретение навыков прогнозирования конденсационных гидроударов при авариях с течью теплоносителя на АЭС.;
- Освоение методов расчета амплитуд гидроударов в трубопроводах АЭС.;
- Формирование качественных представлений о закономерностях возникновения и развития паровых взрывов при тяжелых авариях на АЭС..

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-2 Владеет расчетно-теоретическими и экспериментальными методами исследования теплогидравлических и нейтронно-физических процессов в энергетическом оборудовании	ИД-4 <sub>ПК-2</sub> Владеет знаниями в области многофазной теплогидравлики, лежащими в основе современных методов и подходов к исследованию нестационарных теплогидравлических процессов	знать: - Основы динамики многофазных течений и методов исследований динамических процессов в многофазных системах..  уметь: - Выполнять расчетные оценки и экспериментальные исследования быстрых многофазных процессов в энергетическом оборудовании..

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Физико-технические проблемы атомной энергетики (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 2 зачетных единицы, 72 часа.

№ 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	Введение в механику многофазных сред	12	2	8	-	-	-	-	-	-	-	4	-	<p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Введение в механику многофазных сред"</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Введение в механику многофазных сред"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 12-20 [2], стр. 18-30 [3], стр. 22-56</p>
1.1	Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в многофазных потоках	6		4	-	-	-	-	-	-	-	2	-	
1.2	Описание межфазного взаимодействия	6		4	-	-	-	-	-	-	-	2	-	
2	Конденсационный гидроудар в двух-фазных потоках	21		12	-	-	-	-	-	-	-	-	9	
2.1	Механизм возникновения конденсационных гидроударов	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	<p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Конденсационный гидроудар в двух-фазных потоках"</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Конденсационный гидроудар в двух-фазных потоках"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], стр. 10-20</p>
2.2	Экспериментальные исследования конденсационных гидроударов	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	
2.3	Расчетно-теоретические исследования конденсационных гидроударов	9	4	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	

3	Паровые взрывы	21	12	-	-	-	-	-	-	-	9	-	<u><b>Подготовка к текущему контролю:</b></u> Повторение материала по разделу "Паровые взрывы" <u><b>Самостоятельное изучение теоретического материала:</b></u> Изучение дополнительного материала по разделу "Паровые взрывы" <u><b>Изучение материалов литературных источников:</b></u> [4], стр. 34-39 [5], стр. 49-54
3.1	Общие сведения	6	4	-	-	-	-	-	-	-	2	-	
3.2	Перемешивание расплава с охладителем	9	4	-	-	-	-	-	-	-	5	-	
3.3	Термическая детонация в многофазной смеси	6	4	-	-	-	-	-	-	-	2	-	
	Зачет с оценкой	18.0	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	17.7	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>72.0</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.3</b>	<b>22</b>	<b>17.7</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>72.0</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.3</b>	<b>39.7</b>		

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – 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. Введение в механику многофазных сред

##### 1.1. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в многофазных потоках

Основные понятия механики многофазных сред. Определение объемной доли фазы. Вывод уравнений сохранения масс фаз. Вывод уравнений сохранения импульсов фаз. Вывод уравнений сохранения энергий фаз. Первые интегралы уравнений сохранения..

##### 1.2. Описание межфазного взаимодействия

Силы межфазного взаимодействия. Сила присоединенных масс. Корреляции для описания межфазных сил. Описание межфазного теплообмена. Определение скорости фазового перехода..

#### 2. Конденсационный гидроудар в двух-фазных потоках

##### 2.1. Механизм возникновения конденсационных гидроударов

Стратифицированное течение пара и воды в горизонтальном канале. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Переход стратифицированного течения в пробковое. Критерий Тайтеля-Даклера..

##### 2.2. Экспериментальные исследования конденсационных гидроударов

Экспериментальное исследование Бьёржа и Гриффита возникновения конденсационных гидроударов в горизонтальной трубе. Область параметров, при которых реализуются конденсационные гидроудары. Исследование конденсационных гидроударов в условиях холодной стенки трубы, выполненное Кондо и Анода. Эксперименты, выполненные в ФЭИ и ЭНИЦ..

##### 2.3. Расчетно-теоретические исследования конденсационных гидроударов

Математические модели роста возмущения на поверхности воды при стратифицированном течении (линейная теория устойчивости, влияние поверхностного натяжения, теория Кордобьяна-Ранова, модель Уоллиса, модель Ишии-Мишимы, модель Гарднера). Межфазный теплообмен при стратифицированном течении. Описание кода WANA, разработанного для моделирования конденсационных гидроударов. Критерии Гриффита..

#### 3. Паровые взрывы

##### 3.1. Общие сведения

Механизм парового взрыва. Паровые взрывы в природе и техногенной сфере. Паровые взрывы на АЭС: внутрикорпусные, внекорпусные, стратифицированные. Концептуальная схема протекания крупномасштабного парового взрыва..

##### 3.2. Перемешивание расплава с охладителем

Экспериментальные исследования фрагментации струи расплава в охладителе (эксперименты FARO, MAGICO, DEFOR). Математические модели фрагментации струи и перемешивания расплава с охладителем. Механизм перемешивания в стратифицированном паровом взрыве..

##### 3.3. Термическая детонация в многофазной смеси

Экспериментальные исследования термической детонации (эксперименты KROTOS, FITS, SERENA). Математическое моделирование термической детонации. Концепция микровзаимодействий. Техника адиабат Гюгонио для оценки параметров волны термической детонации..

**3.3. Темы практических занятий**  
не предусмотрено

**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 "Введение в механику многофазных сред"
2. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Конденсационный гидроудар в двух-фазных потоках"
3. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Паровые взрывы"

**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>					
Основы динамики многофазных течений и методов исследований динамических процессов в многофазных системах.	ИД-4ПК-2	+	+	+	Контрольная работа/Основные представления о конденсационных гидроударах Контрольная работа/Основы механики многофазных сред Контрольная работа/Паровые взрывы Контрольная работа/Расчетные оценки конденсационных гидроударов
<b>Уметь:</b>					
Выполнять расчетные оценки и экспериментальные исследования быстрых многофазных процессов в энергетическом оборудовании.	ИД-4ПК-2	+	+	+	Контрольная работа/Основные представления о конденсационных гидроударах Контрольная работа/Основы механики многофазных сред Контрольная работа/Паровые взрывы Контрольная работа/Расчетные оценки конденсационных гидроударов



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

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

**2 семестр**

Форма реализации: Билеты (письменный опрос)

1. Основные представления о конденсационных гидроударах (Контрольная работа)
2. Основы механики многофазных сред (Контрольная работа)
3. Паровые взрывы (Контрольная работа)
4. Расчетные оценки конденсационных гидроударов (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

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

*Зачет с оценкой (Семестр №2)*

Оценка определяется по итогам выполнения всех контрольных мероприятий.

В диплом выставляется оценка за 2 семестр.

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

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

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

1. Мелихов, В. И. Двухжидкостная модель течения теплоносителя в ЯЭУ. Часть 1 : учебное пособие по курсу "Теплогидравлика ЯЭУ" по направлению 14.04.01 "Ядерная энергетика и теплофизика", профилю подготовки "Физико-технические проблемы атомной энергетики" / В. И. Мелихов, О. И. Мелихов, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – М. : Изд-во МЭИ, 2018 . – 75 с. - ISBN 978-5-7046-1923-9 .  
<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=10305>;
2. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. Ч.1 / Р. И. Нигматулин . – М. : Наука, 1987 . – 464 с.;
3. Мелихов, В. И. Основы механики двухфазных потоков : учебное пособие для вузов / В. И. Мелихов, О. И. Мелихов, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2016 . – 60 с. - ISBN 978-5-7046-1734-1 .  
<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=8484>;
4. Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ"). Вестник МЭИ : теоретический и научно-практический журнал / Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – 1994- . – М. : Изд-во МЭИ, 1994- . - Выходит 6 раз в год . – С 2016 г. доступен в электронном виде . - ISSN 1993-6982 . Вестник МЭИ . – 2017 . – №2 .;
5. "Вестник Московского энергетического института", Издательство: "Издательство МЭИ", Москва, 2016 - (98 с.)  
<https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=442978>.

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

1. Office / Российский пакет офисных программ.

### 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. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>

### 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	Т-320, Учебная аудитория	стол, стул, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Т-319, Учебная аудитория	стол, стул, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная
Помещения для самостоятельной работы	НТБ-201, Компьютерный читальный зал	стол компьютерный, стул, стол письменный, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный, принтер, кондиционер
Помещения для консультирования	Т-319, Учебная аудитория	стол, стул, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	Т-317, Помещение учебно-вспомогательного персонала	стол, стул, шкаф, тумба, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный, принтер

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

## Газодинамика двухфазных сред

(название дисциплины)

## 2 семестр

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

КМ-1 Основы механики многофазных сред (Контрольная работа)

КМ-2 Основные представления о конденсационных гидроударах (Контрольная работа)

КМ-3 Расчетные оценки конденсационных гидроударов (Контрольная работа)

КМ-4 Паровые взрывы (Контрольная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	4	8	12	16
1	Введение в механику многофазных сред					
1.1	Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в многофазных потоках		+	+	+	+
1.2	Описание межфазного взаимодействия		+	+	+	+
2	Конденсационный гидроудар в двух-фазных потоках					
2.1	Механизм возникновения конденсационных гидроударов		+	+	+	+
2.2	Экспериментальные исследования конденсационных гидроударов		+	+	+	+
2.3	Расчетно-теоретические исследования конденсационных гидроударов		+	+	+	+
3	Паровые взрывы					
3.1	Общие сведения		+	+	+	+
3.2	Перемешивание расплава с охладителем		+	+	+	+
3.3	Термическая детонация в многофазной смеси		+	+	+	+
Вес КМ, %:			25	25	25	25