

**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: Физика и техника низких температур

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ**

<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.08.01.02</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>1 семестр - 5;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>180 часов</b>
<b>Лекции</b>	<b>1 семестр - 16 часов;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>1 семестр - 32 часа;</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>1 семестр - 2 часа;</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>1 семестр - 129,5 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>Экзамен</b>	<b>1 семестр - 0,5 часа;</b>

**Москва 2023**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

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

Ю.Ю. Пузина

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Крюков А.П.
	Идентификатор	R9b81f956-KryukovAP-8dacf4ed

А.П. Крюков

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

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** теоретическое изучение стационарных и нестационарных процессов теплопередачи в двухфазных потоках при течении рабочих тек низкотемпературных установок

### Задачи дисциплины

- приобретение навыков формулировать физико-математические модели для стационарных и нестационарных потоков в криогенных системах с использованием законов (уравнений) сохранения;
- приобретение навыков формулировать физико-математические модели для стационарных и нестационарных потоков в криогенных системах с использованием законов (уравнений) сохранения;
- доведение расчетов до количественных результатов с использованием современного справочного материала.

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 в элементах энергетического оборудования	ИД-2 <sub>ПК-1</sub> Владеет навыками расчета теплогидравлических процессов в элементах энергетического оборудования, навыки постобработки результатов расчетов и компьютерного моделирования этих процессов	знать: - основные количественные характеристики, используемые при расчете двухфазного потока.  уметь: - самостоятельно разбираться в существующих методиках расчета процессов в криогенных емкостях и применять их для решения поставленной задачи.
ПК-3 Готов самостоятельно определять направление и характер проводимых исследований, учитывать современные тенденции развития низкотемпературной техники	ИД-3 <sub>ПК-3</sub> Способен проводить комплексный анализ низкотемпературного оборудования как части энергетической системы	знать: - основные количественные характеристики, используемые при расчете двухфазного потока.  уметь: - основные количественные характеристики, используемые при расчете двухфазного потока.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Физика и техника низких температур (далее – ОПОП), направления подготовки 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать основные количественные характеристики, используемые при расчете двухфазного потока
- знать расчетно-экспериментальные подходы к расчету теплофизических процессов, возникающих при работе с жидкими криогенными продуктами

- уметь рассчитывать коэффициенты теплоотдачи при конденсации и кипении в двухфазном потоке, критические тепловые потоки
- уметь самостоятельно разбираться в существующих методиках расчета процессов в криогенных емкостях и применять их для решения поставленной задачи

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	Количественные характеристики двухфазных потоков	36	1	4	-	8	-	-	-	-	-	24	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [4], 12-250
1.1	Количественные характеристики двухфазных потоков	36		4	-	8	-	-	-	-	-	24	-	
2	Теплопередача в двухфазных потоках	36		4	-	8	-	-	-	-	-	24	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 412-485
2.1	Теплопередача в двухфазных потоках	36		4	-	8	-	-	-	-	-	24	-	
3	Экспериментальное исследование гидродинамической неустойчивости кипящего в канале вынужденного потока азота	36		4	-	8	-	-	-	-	-	24	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [2], 58-118
3.1	Экспериментальное исследование гидродинамической неустойчивости кипящего в канале вынужденного потока азота	36		4	-	8	-	-	-	-	-	24	-	
4	Теплообмен при вынужденном течении в канале многокомпонентных	36	4	-	8	-	-	-	-	-	24	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 15-93	

	рабочих тел, используемых в низкотемпературных установках Особенности теплопередачи в двухфазном потоке многокомпонентного												
4.1	Теплообмен при вынужденном течении в канале многокомпонентных рабочих тел, используемых в низкотемпературных установках Особенности теплопередачи в двухфазном потоке многокомпонентного	36	4	-	8	-	-	-	-	-	24	-	
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>180.0</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>96</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>180.0</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>129.5</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. Количественные характеристики двухфазных потоков

##### 1.1. Количественные характеристики двухфазных потоков

Классификация и количественные характеристики двухфазных потоков. Структура двухфазных течений в вертикальных и горизонтальных каналах. Карты режимов течения. Уравнение сохранения энергии парожидкостного потока. Влияние теплообмена на гидравлическое сопротивление. Смена режимов течения в парогенерирующем канале..

#### 2. Теплопередача в двухфазных потоках

##### 2.1. Теплопередача в двухфазных потоках

Теплообмен при конденсации пара, движущегося внутри труб. Конденсация пара в промышленных аппаратах и методы ее интенсификации. Теплообмен при кипении жидкости в условиях вынужденного движения. Кризис теплообмена при кипении жидкостей в каналах. Колебательная неустойчивость..

#### 3. Экспериментальное исследование гидродинамической неустойчивости кипящего в канале вынужденного потока азота

##### 3.1. Экспериментальное исследование гидродинамической неустойчивости кипящего в канале вынужденного потока азота

Экспериментальная установка. Методика проведения опытов. Результаты экспериментального исследования гидродинамической неустойчивости течения в канале кипящего азота. Влияние режимных параметров. Результаты экспериментального исследования теплоотдачи при кипении вынужденного потока азота в канале. Результаты экспериментального исследования кризиса кипения вынужденного потока азота в канале. Расчетное определение границы гидродинамической неустойчивости (термические колебания) течения в канале кипящего азота с использованием полученных опытных данных..

#### 4. Теплообмен при вынужденном течении в канале многокомпонентных рабочих тел, используемых в низкотемпературных установках Особенности теплопередачи в двухфазном потоке многокомпонентного

##### 4.1. Теплообмен при вынужденном течении в канале многокомпонентных рабочих тел, используемых в низкотемпературных установках Особенности теплопередачи в двухфазном потоке многокомпонентного

Особенности теплопередачи в двухфазном потоке многокомпонентного рабочего тела. Экспериментальный стенд для исследования теплообмена при кипении многокомпонентных рабочих тел. Экспериментальные данные по теплообмену при кипении многокомпонентных рабочих тел. Сравнение экспериментальных и расчетных данных.

### **3.3. Темы практических занятий**

1. Методы определения паросодержания в двухфазном потоке;
2. Определение коэффициента теплоотдачи при вынужденном течении в канале двухфазного потока (кипение и конденсация);
3. Особенности проведения экспериментальных исследований в двухфазных потоках криогенной жидкости.;
4. Расчет теплофизических свойств и теплопередачи при течении двухфазного

многокомпонентного рабочего тела в канале.

**3.4. Темы лабораторных работ**  
не предусмотрено

**3.5 Консультации**

**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>						
основные количественные характеристики, используемые при расчете двухфазного потока	ИД-2ПК-1				+	Контрольная работа/Методы экспериментальных исследований двухфазных течений
основные количественные характеристики, используемые при расчете двухфазного потока	ИД-3ПК-3			+		Контрольная работа/Уравнение движения в расслоенном двухфазном потоке
<b>Уметь:</b>						
самостоятельно разбираться в существующих методиках расчета процессов в криогенных емкостях и применять их для решения поставленной задачи	ИД-2ПК-1		+			Контрольная работа/Теплопередача в двухфазном потоке
основные количественные характеристики, используемые при расчете двухфазного потока	ИД-3ПК-3	+				Контрольная работа/Теплопередача в двухфазном потоке при течении многокомпонентного хладагента

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

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

**1 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Методы экспериментальных исследований двухфазных течений (Контрольная работа)
2. Теплопередача в двухфазном потоке (Контрольная работа)
3. Теплопередача в двухфазном потоке при течении многокомпонентного хладагента (Контрольная работа)
4. Уравнение движения в расслоенном двухфазном потоке (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

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

Экзамен (Семестр №1)

В диплом выставляется оценка за 1 семестр.

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

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

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

1. Ягов, В. В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях : учебное пособие для вузов по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / В. В. Ягов . – М. : Издательский дом МЭИ, 2014 . – 542 с. - ISBN 978-5-383-00854-6 .;
2. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин . – М. : Высшая школа, 1983 . – 448 с.;
3. Лунин, А. И. Применение многокомпонентных рабочих тел в низкотемпературной технике : учебное пособие по курсам "Термодинамика смесей и растворов", "Основы холодильной техники", "Холодильные машины и установки" по направлению "Техническая физика" / А. И. Лунин, В. И. Могорычный, В. Н. Коваленко, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Издательский дом МЭИ, 2009 . – 100 с. - ISBN 978-5-383-00341-1 .  
<http://elibrary.mpei.ru/elibrary/view.php?id=1463>;
4. Лабунцов Д.А. , Ягов В.В. - "Механика двухфазных систем", Издательство: "Издательский дом МЭИ", Москва, 2016 - (384 с.)  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=72240](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72240).

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

1. 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)

## 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 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
Помещения для самостоятельной работы	М-411/1, Компьютерный класс	стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, компьютер персональный
Помещения для консультирования	М-402, Аудитория каф. "НТ"	стеллаж для хранения книг, 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

### Методы исследования двухфазных потоков

(название дисциплины)

#### 1 семестр

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

- КМ-1 Уравнение движения в расслоенном двухфазном потоке (Контрольная работа)
- КМ-2 Методы экспериментальных исследований двухфазных течений (Контрольная работа)
- КМ-3 Теплопередача в двухфазном потоке (Контрольная работа)
- КМ-4 Теплопередача в двухфазном потоке при течении многокомпонентного хладагента (Контрольная работа)

**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	Количественные характеристики двухфазных потоков					
1.1	Количественные характеристики двухфазных потоков					+
2	Теплопередача в двухфазных потоках					
2.1	Теплопередача в двухфазных потоках				+	
3	Экспериментальное исследование гидродинамической неустойчивости кипящего в канале вынужденного потока азота					
3.1	Экспериментальное исследование гидродинамической неустойчивости кипящего в канале вынужденного потока азота		+			
4	Теплообмен при вынужденном течении в канале многокомпонентных рабочих тел, используемых в низкотемпературных установках Особенности теплопередачи в двухфазном потоке многокомпонентного					
4.1	Теплообмен при вынужденном течении в канале многокомпонентных рабочих тел, используемых в низкотемпературных установках Особенности теплопередачи в двухфазном потоке многокомпонентного			+		
Вес КМ, %:			25	25	25	25