

**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**  
**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ**  
**СИСТЕМАХ**

<b>Блок:</b>	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
<b>Часть образовательной программы:</b>	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	Б1.Ч.08.03.02
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	2 семестр - 4;
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	144 часа
<b>Лекции</b>	2 семестр - 16 часов;
<b>Практические занятия</b>	2 семестр - 32 часа;
<b>Лабораторные работы</b>	не предусмотрено учебным планом
<b>Консультации</b>	2 семестр - 2 часа;
<b>Самостоятельная работа</b>	2 семестр - 93,5 часа;
<b>в том числе на КП/КР</b>	не предусмотрено учебным планом
<b>Иная контактная работа</b>	проводится в рамках часов аудиторных занятий
<b>включая:</b> Контрольная работа Решение задач Реферат	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Экзамен</b>	2 семестр - 0,5 часа;

**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, протекающих в криогенном емкостном оборудовании, а также при транспортировании и регазификации криогенных жидкостей, позволяющее проводить расчеты основных технологических операций

### Задачи дисциплины

- приобретение навыков формулировать физико-математические модели для стационарных и нестационарных теплофизических процессов в криогенных системах с использованием законов (уравнений) сохранения и термодинамики открытых систем;
- изучение способов решения различных задач и методов расчета теплофизических процессов в криогенных системах;
- доведение расчетов теплофизических процессов, возникающих при эксплуатации систем с жидкими криоагентами 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-5 <sub>ПК-1</sub> Знает методы определения параметров работы элементов энергетического оборудования и способен провести их оценку	знать: - Аналитические и экспериментальные подходы к определению характерных параметров теплофизических процессов, возникающих при работе с жидкими криогенными продуктами. Основные положения низкотемпературной термодинамики, гидродинамики, теплообмена, необходимых для расчета технологических операций с криогенными жидкостями.
ПК-3 Готов самостоятельно определять направление и характер проводимых исследований, учитывать современные тенденции развития низкотемпературной техники	ИД-2 <sub>ПК-3</sub> Знает основные направления развития и современные тенденции при расчете и анализе эффективности низкотемпературных установках	уметь: - Самостоятельно разбираться в существующих методиках расчета процессов в криогенных емкостях и применять их для решения поставленной задачи. Анализировать теплогидравлические процессы в элементах низкотемпературного оборудования и применять соответствующие методики расчета.

## 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 Аналитические и экспериментальные подходы к определению характерных параметров теплофизических процессов, возникающих при работе с жидкими криогенными продуктами.

Основные положения низкотемпературной термодинамики, гидродинамики, теплообмена, необходимых для расчета технологических операций с криогенными жидкостями

- уметь Самостоятельно разбираться в существующих методиках расчета процессов в криогенных емкостях и применять их для решения поставленной задачи. Анализировать теплогидравлические процессы в элементах низкотемпературного оборудования и применять соответствующие методики расчета

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 4 зачетных единицы, 144 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	Физико-математические модели нестационарных теплогидравлических процессов в обогреваемых каналах	18	2	2	-	4	-	-	-	-	-	12	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 20-150
1.1	Физико-математические модели нестационарных теплогидравлических процессов в обогреваемых каналах	18		2	-	4	-	-	-	-	-	12	-	
2	Теплофизические процессы в криогенных трубопроводах	26		4	-	10	-	-	-	-	-	12	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 180-265
2.1	Теплофизические процессы в криогенных трубопроводах	26		4	-	10	-	-	-	-	-	12	-	
3	Регазификация криогенных жидкостей	14		2	-	4	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [2], 50-82 [3], 125-198
3.1	Регазификация криогенных жидкостей	14		2	-	4	-	-	-	-	-	8	-	

4	Переходные процессы в криогенных трубопроводах	18	2	-	4	-	-	-	-	-	12	-	<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [3], 80-120
4.1	Переходные процессы в криогенных трубопроводах	18	2	-	4	-	-	-	-	-	12	-	
5	Теплофизические процессы в криогенных резервуарах	32	6	-	10	-	-	-	-	-	16	-	<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [3], 20-78
5.1	Теплофизические процессы в криогенных резервуарах	32	6	-	10	-	-	-	-	-	16	-	
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>144.0</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>60</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>144.0</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>93.5</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. Физико-математические модели нестационарных теплогидравлических процессов в обогреваемых каналах

1.1. Физико-математические модели нестационарных теплогидравлических процессов в обогреваемых каналах

Физико-математические модели нестационарных процессов, основные уравнения движения однофазного и двухфазного потоков в одномерной постановке, переходные процессы в обогреваемом канале при течении однофазной и двухфазной жидкости..

#### 2. Теплофизические процессы в криогенных трубопроводах

2.1. Теплофизические процессы в криогенных трубопроводах

Течение криогенной жидкости в неадиабатном трубопроводе. Обеспечение однофазности потока. Оптимальная скорость потока. Захолаживание и заполнение трубопроводов криогенной жидкостью. Модель температурного скачка. Влияние теплоемкости стенки на длительность заполнения канала при постоянном перепаде давлений. Заполнение короткого канала..

#### 3. Регазификация криогенных жидкостей

3.1. Регазификация криогенных жидкостей

Теплоотдача при течении жидкости в канале. Теплоотдача на наружной поверхности каналов с учетом эффекта вымораживания. Теплогидравлическая неустойчивость и переходные процессы при течении жидкости в парогенерирующем канале..

#### 4. Переходные процессы в криогенных трубопроводах

4.1. Переходные процессы в криогенных трубопроводах

Гидродинамика процесса заполнения. Первичный и вторичный гидроудары, гидроудар при открытии клапана, меры снижения гидроударов..

#### 5. Теплофизические процессы в криогенных резервуарах

5.1. Теплофизические процессы в криогенных резервуарах

Термодинамика открытых систем. Процессы хранения криогенной жидкости в сосуде с открытым и закрытым дренажем. Верхняя и нижняя заправка криогенных резервуаров, бездренажная заправка. Процесс выдачи жидкости из резервуара. Вскипание жидкости при снижении давления. Процессы охлаждения криогенных жидкостей. Процессы кристаллизации диоксида углерода при хранении и газификации криогенных жидкостей..

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

1. Процесс выдачи криогенной жидкости из резервуара;
2. Процесс заправки криогенного резервуара;
3. Процесс бездренажного хранения криогенной жидкости;
4. Гидроудар при закрытии и открытии клапана;
5. Процесс заполнения длинного трубопровода криогенной жидкостью;
6. Гидравлическое сопротивление при течении жидкости с недогревом в обогреваемом 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	5	
<b>Знать:</b>							
Аналитические и экспериментальные подходы к определению характерных параметров теплофизических процессов, возникающих при работе с жидкими криогенными продуктами. Основные положения низкотемпературной термодинамики, гидродинамики, теплообмена, необходимых для расчета технологических операций с криогенными жидкостями	ИД-5ПК-1	+	+			+	Реферат/"Теплофизические процессы в современном криогенном оборудовании" Решение задач/Типовой расчет "Хранение, заправка и выдача криогенной жидкости"
<b>Уметь:</b>							
Самостоятельно разбираться в существующих методиках расчета процессов в криогенных емкостях и применять их для решения поставленной задачи. Анализировать теплогидравлические процессы в элементах низкотемпературного оборудования и применять соответствующие методики расчета	ИД-2ПК-3			+	+		Контрольная работа/«Гидравлическое сопротивление двухфазных потоков» Контрольная работа/«Переходные процессы в трубопроводах» Решение задач/Типовой расчет "Хранение, заправка и выдача криогенной жидкости"

#### **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: Письменная работа

1. "Теплофизические процессы в современном криогенном оборудовании" (Реферат)
2. «Гидравлическое сопротивление двухфазных потоков» (Контрольная работа)
3. «Переходные процессы в трубопроводах» (Контрольная работа)

Форма реализации: Проверка задания

1. Типовой расчет "Хранение, заправка и выдача криогенной жидкости" (Решение задач)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

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

*Экзамен (Семестр №2)*

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и аттестационной составляющих

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. Баррон, Р. Ф. Криогенные системы : пер. с англ. / Р. Ф. Баррон, С. П. Горбачев, Е. В. Сидоров ; Ред. А. К. Городов . – М. : Энергоатомиздат, 1989 . – 406 с. - ISBN 5-283-02431-8 : 2.10 .;
2. Серов, Е. П. Динамика парогенераторов / Е. П. Серов, Б. П. Корольков . – 2-е изд., перераб. и доп . – М. : Энергоиздат, 1981 . – 408 с.;
3. Архаров А. М., Кунис И. Д.- "Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов", Издательство: "МГТУ им. Баумана", Москва, 2006 - (252 с.) <https://e.lanbook.com/book/106301>.

##### **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. Электронные ресурсы издательства Springer - <https://link.springer.com/>
2. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
3. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>

#### **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

### Теплофизические процессы в низкотемпературных системах

(название дисциплины)

#### 2 семестр

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

КМ-1 «Гидравлическое сопротивление двухфазных потоков» (Контрольная работа)

КМ-2 «Переходные процессы в трубопроводах» (Контрольная работа)

КМ-3 Типовой расчет "Хранение, заправка и выдача криогенной жидкости" (Решение задач)

КМ-4 "Теплофизические процессы в современном криогенном оборудовании" (Реферат)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	6	9	12	16
1	Физико-математические модели нестационарных теплогидравлических процессов в обогреваемых каналах					
1.1	Физико-математические модели нестационарных теплогидравлических процессов в обогреваемых каналах				+	+
2	Теплофизические процессы в криогенных трубопроводах					
2.1	Теплофизические процессы в криогенных трубопроводах				+	+
3	Регазификация криогенных жидкостей					
3.1	Регазификация криогенных жидкостей		+	+	+	
4	Переходные процессы в криогенных трубопроводах					
4.1	Переходные процессы в криогенных трубопроводах		+	+	+	
5	Теплофизические процессы в криогенных резервуарах					
5.1	Теплофизические процессы в криогенных резервуарах				+	+
Вес КМ, %:			25	25	25	25