

**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**  
**ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В СУЩЕСТВЕННО НЕРАВНОВЕСНЫХ**  
**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.03
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	2 семестр - 4;
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	144 часа
<b>Лекции</b>	2 семестр - 32 часа;
<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 - 77,5 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> <b>Коллоквиум</b> <b>Контрольная работа</b>	
<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	Крюков А.П.
	Идентификатор	R9b81f956-KryukovAP-8dacf4ed

А.П. Крюков


**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:** Изучение особенностей процессов переноса, характеризующихся значительной неравновесностью, при их реализации в соответствующих прикладных задачах и устройствах

### Задачи дисциплины

- изучение методов описания систем, работающих в условиях сильной неравновесности процессов переноса;
- приобретение навыков принятия и обоснования конкретных технических решений при разработке низкотемпературных устройств и систем охлаждения теплонапряженного оборудования.

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-3ПК-1 Умеет применять различные подходы к расчету процессов теплопереноса в зависимости от режимных параметров работы элементов энергетического оборудования	знать: - расчетно-теоретические и экспериментальные методы исследования теплогидравлических процессов в условиях значительного отклонения от состояния термодинамического равновесия и принципы их моделирования в конкретных технических системах; - способы расчета существенно неравновесных процессов переноса с целью применения их на практике для разработки энергонапряженного оборудования, машин и аппаратов высоких технологий.  уметь: - анализировать информацию о технологиях осуществления существенно неравновесных процессов переноса; - применять современные методы исследования, проводить технические испытания и (или) научные эксперименты;.

## 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 расчетно-теоретические и экспериментальные методы исследования теплогидравлических процессов в условиях значительного отклонения от состояния

термодинамического равновесия и принципы их моделирования в конкретных технических системах

- знать способы расчета существенно неравновесных процессов переноса с целью применения их на практике для разработки энергонапряженного оборудования, машин и аппаратов высоких технологий

- уметь применять современные методы исследования, проводить технические испытания и (или) научные эксперименты;

- уметь анализировать информацию о технологиях осуществления существенно неравновесных процессов переноса

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	Постановка задач расчета испарения и конденсации однокомпонентной среды и парогазовых смесей	10	2	2	-	4	-	-	-	-	-	4	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 5-65	
1.1	Постановка задач расчета испарения и конденсации однокомпонентной среды и парогазовых смесей	10		2	-	4	-	-	-	-	-	4	-		
2	Методы расчета термических сопротивлений, определенных в п. 1	18		6	-	6	-	-	-	-	-	6	-		<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 65-84
2.1	Методы расчета термических сопротивлений, определенных в п. 1	18		6	-	6	-	-	-	-	-	6	-		
3	Обзор методов решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации	14		4	-	2	-	-	-	-	-	8	-		<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [2], 5-24
3.1	Обзор методов	14	4	-	2	-	-	-	-	-	8	-			

	решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации												
4	Результаты исследования задач испарения-конденсации	26	8	-	6	-	-	-	-	-	12	-	<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [1], 65-124
4.1	Результаты исследования задач испарения-конденсации	26	8	-	6	-	-	-	-	-	12	-	
5	Решение прикладных задач	40	12	-	14	-	-	-	-	-	14	-	<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [3], 200-256
5.1	Кипение сверхтекучего гелия	12	4	-	4	-	-	-	-	-	4	-	
5.2	Процессы криовакуумирования	10	2	-	4	-	-	-	-	-	4	-	
5.3	Конденсация паров металлов	6	2	-	2	-	-	-	-	-	2	-	
5.4	Определение форм межфазных поверхностей при переноса массы, импульса, энергии.	6	2	-	2	-	-	-	-	-	2	-	
5.5	Сонолюминесценция	6	2	-	2	-	-	-	-	-	2	-	
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>144.0</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>44</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>144.0</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>77.5</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. Постановка задач расчета испарения и конденсации однокомпонентной среды и парогазовых смесей

1.1. Постановка задач расчета испарения и конденсации однокомпонентной среды и парогазовых смесей

Термические сопротивления: внешнее (газодинамическое), межфазное, пленки конденсата.. Роль каждого в зависимости от интенсивности процесса..

#### 2. Методы расчета термических сопротивлений, определенных в п.1

2.1. Методы расчета термических сопротивлений, определенных в п.1

Решение уравнения Больцмана во всей области, занятой газовой фазой.. Уравнения Навье-Стокса в газодинамической подобласти и уравнения Больцмана в слое Кнудсена. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии для конденсата.

#### 3. Обзор методов решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации

3.1. Обзор методов решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации

Линейная теория.. Моментный метод решения одномерных задач.. Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана (для разных чисел Кнудсена, многомерные задачи). Прямое статистическое моделирование. Модельные уравнения..

#### 4. Результаты исследования задач испарения-конденсации

4.1. Результаты исследования задач испарения-конденсации

Параметричность испарения, дозвуковой и сверхзвуковой конденсации. Предельные потоки испарения-конденсации.. Инженерные соотношения для расчета испарения и конденсации в дозвуковом режиме. Диаграмма предельных потоков в сверхзвуковой области.. Конденсация в присутствии неконденсируемых газов.. Кривые  $q=f(\Delta T)$  для конденсации-испарения во всем диапазоне изменения интенсивностей. Рекомендации по уменьшению  $\Delta T$ .. Определение итогового перепада температур от газа через межфазную поверхность, пленку конденсата, стенку теплообменника (конденсатора) охлаждающему теплоносителю. Влияние неполной конденсации на границе раздела фаз на характеристики процесса.. Модели описания: коэффициенты испарения-конденсации, система кинетических уравнений для молекул газа и фононов конденсата; расчет взаимодействий молекул газа и конденсата методами молекулярной динамики; предельные скорости и предельные потоки массы..

#### 5. Решение прикладных задач

5.1. Кипение сверхтекучего гелия

Кривая кипения сверхтекучего гелия. Пиковая и "восстановительная" тепловая нагрузка. Расчет "восстановительной" тепловой нагрузки по линейной теории и в общем случае.. Перенос тепла через паровую пленку для нелинейных задач в одномерной и двумерной постановке. Перенос массы и энергии в ограниченной паровой области при наличии градиента температур на межфазной поверхности. Расчет эволюции паровой пленки при больших тепловых нагрузках для плоского, цилиндрического и сферического нагревателей.. Особенности теплообмена в Hell при пониженной гравитации. Задачи теплопереноса в

капиллярно-пористом теле, заполненном Hell. Расчет процессов переноса в единичном капилляре при наличии продольного теплового потока..

#### 5.2. Процессы криовакуумирования

Роль направленности потоков при криоконденсации (десублимации).. Расчет теплопереноса в области неприменимости законов градиентного типа.. Примеры расчета течений, характеризующихся малыми числами Кнудсена, с учетом сильной неравновесности на межфазной границе..

#### 5.3. Конденсация паров металлов

Роль процессов переноса на межфазной поверхности при определении общего термического сопротивления в системе: пар – пленка конденсата – стенка конденсатора – охлаждающий теплоноситель.. Влияние неконденсируемых газов.. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными..

5.4. Определение форм межфазных поверхностей при переноса массы, импульса, энергии.

Зависимость формы межфазной поверхности от способа подвода теплоты к границе раздела фаз пар-жидкость. Соответствующая классификация задач тепломассопереноса.. Плавание горячих капель в холодных жидкостях. Пленочное кипение недогретой воды на нагревателях различной формы.. Эволюция паровых пленок. Необходимость применения при описании неравновесных граничных условий..

#### 5.5. Сонолюминесценция

Сущность явления. Математическое описание: уравнения сохранения для жидкости и парогазовой смеси; универсальные и специальные условия совместности.. Влияние испарения-конденсации на межфазной поверхности на характеристики процесса..

### 3.3. Темы практических занятий

1. Применение уравнения Рэлея для решения задачи о схлопывании парогазового пузыря при сонолюминесценции. Приближенное описание явления формирования ударной волны внутри пузыря;
2. Особенности эволюции паровых образований на нагревателях цилиндрической и шаровой формы, погруженных в жидкости с низкой и высокой эффективностью теплопереноса;
3. Определение формы межфазной поверхности азота при плавлении в нем капли воды. Отличия от традиционных «гидростатических» задач;
4. Движение перемычек гелия-II в капиллярах при наличии осевого теплового потока;
5. Эволюция паровых пленок при кипении гелия-II. Приближенный подход и расчет на основе уравнения Рэлея;
6. Расчет восстановительных нагрузок при кипении гелия-II на нагревателях цилиндрической и шаровой формы;
7. Определение предельной плотности газа при запаривании конденсации из парогазовой среды;
8. Испарение и конденсация при наличии неконденсируемых компонентов;
9. Влияние коэффициентов испарения и конденсации. Способ пересчета результатов решения задачи об интенсивной конденсации;
10. Определение плотности потока массы при интенсивной конденсации с помощью приближенного соотношения, полученного на базе молекулярно-кинетической теории. Сравнение с результатами применения традиционного подхода;



11. Приближенный метод определения теплопереноса через слой разреженного газа при произвольных числах Кнудсена. Примеры применения для наноразмерных систем;
12. Законы сохранения в виде выражений молекулярно-кинетической теории. Расчет теплового потока для свободномолекулярного предела;
13. Применение законов сохранения в дифференциальной форме для решения задачи о конденсации чистого пара на поверхности;
14. Применение методов молекулярной динамики для задач энерго-массопереноса в двухфазных системах;
15. Предельные значения коэффициентов конденсации и удельных потоков массы;
16. Решение уравнения сохранения энергии в интегральной формулировке для задач интенсивного испарения и конденсации в рамках механики сплошных сред.

### **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>							
способы расчета существенно неравновесных процессов переноса с целью применения их на практике для разработки энергонапряженного оборудования, машин и аппаратов высоких технологий	ИД-3ПК-1					+	Коллоквиум/Применение кинетического уравнения Больцмана для решения задач тепло-массопереноса на границах раздела фаз
расчетно-теоретические и экспериментальные методы исследования теплогидравлических процессов в условиях значительного отклонения от состояния термодинамического равновесия и принципы их моделирования в конкретных технических системах	ИД-3ПК-1					+	Коллоквиум/Методы определения форм межфазных поверхностей
<b>Уметь:</b>							
применять современные методы исследования, проводить технические испытания и (или) научные эксперименты;	ИД-3ПК-1	+	+	+			Контрольная работа/Расчет термических сопротивлений при испарении и конденсации
анализировать информацию о технологиях осуществления существенно неравновесных процессов переноса	ИД-3ПК-1				+	+	Контрольная работа/Определение тепловых нагрузок и скоростей движения межфазных поверхностей при кипении сверхтекучего гелия

## **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. Определение тепловых нагрузок и скоростей движения межфазных поверхностей при кипении сверхтекучего гелия (Контрольная работа)
2. Расчет термических сопротивлений при испарении и конденсации (Контрольная работа)

Форма реализации: Устная форма

1. Методы определения форм межфазных поверхностей (Коллоквиум)
2. Применение кинетического уравнения Больцмана для решения задач тепло-массопереноса на границах раздела фаз (Коллоквиум)

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 экзаменационной 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. Крюков, А. П. Процессы переноса в существенно неравновесных системах : учебное пособие по курсу "Процессы переноса в существенно неравновесных системах" по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / А. П. Крюков, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2013 . – 124 с. - ISBN 978-5-9902974-9-4 .  
<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=5690>;
2. Численное решение кинетического уравнения Больцмана в инженерной практике : учебное пособие по курсам "Криофизика" и "Процессы переноса в существенно неравновесных условиях" по направлению "Техническая физика" / А. П. Крюков, В. Ю. Левашов, И. Н. Шишкова, и др., Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Изд-во МЭИ, 2005 . – 80 с. - ISBN 5-7046-1316-0 .;
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.- "Гидродинамика" Т. 6, (6-е изд., испр.), Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2021 - (728 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/185671>.

### **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. База данных журналов издательства Elsevier - <https://www.sciencedirect.com/>
2. Электронные ресурсы издательства Springer - <https://link.springer.com/>
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. 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

### Процессы переноса в существенно неравновесных системах

(название дисциплины)

#### 2 семестр

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

- КМ-1 Применение кинетического уравнения Больцмана для решения задач тепло-массопереноса на границах раздела фаз (Коллоквиум)
- КМ-2 Расчет термических сопротивлений при испарении и конденсации (Контрольная работа)
- КМ-3 Определение тепловых нагрузок и скоростей движения межфазных поверхностей при кипении сверхтекучего гелия (Контрольная работа)
- КМ-4 Методы определения форм межфазных поверхностей (Коллоквиум)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	6	8	12	16
1	Постановка задач расчета испарения и конденсации однокомпонентной среды и парогазовых смесей					
1.1	Постановка задач расчета испарения и конденсации однокомпонентной среды и парогазовых смесей			+		
2	Методы расчета термических сопротивлений, определенных в п.1					
2.1	Методы расчета термических сопротивлений, определенных в п.1			+		
3	Обзор методов решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации					
3.1	Обзор методов решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации			+		
4	Результаты исследования задач испарения-конденсации					
4.1	Результаты исследования задач испарения-конденсации				+	
5	Решение прикладных задач					
5.1	Кипение сверхтекучего гелия				+	
5.2	Процессы криовакуумирования		+			
5.3	Конденсация паров металлов		+			
5.4	Определение форм межфазных поверхностей при переноса массы, импульса, энергии.					+

5.5	Сонолюминесценция				+	
		Вес КМ, %:	25	20	35	20