

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

Блок:	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
Часть образовательной программы:	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
№ дисциплины по учебному плану:	Б1.Ч.03
Трудоемкость в зачетных единицах:	2 семестр - 4;
Часов (всего) по учебному плану:	144 часа
Лекции	2 семестр - 32 часа;
Практические занятия	2 семестр - 32 часа;
Лабораторные работы	не предусмотрено учебным планом
Консультации	2 семестр - 2 часа;
Самостоятельная работа	2 семестр - 77,5 часа;
в том числе на КП/КР	не предусмотрено учебным планом
Иная контактная работа	проводится в рамках часов аудиторных занятий
включая: Коллоквиум Контрольная работа	
Промежуточная аттестация:	
Экзамен	2 семестр - 0,5 часа;

Москва 2026

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Левашов В.Ю.
	Идентификатор	Reccd7acd-LevashovVY-7d6d228a

В.Ю. Левашов

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Ястребов А.К.
	Идентификатор	R0e5b2163-YastrebovAK-2523fea

А.К. Ястребов

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: - применять современные методы исследования, проводить технические испытания и (или) научные эксперименты;; - анализировать информацию о технологиях осуществления существенно неравновесных процессов переноса.

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	-	<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [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	-		<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [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	-		<i><u>Изучение материалов литературных источников:</u></i> [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	
	Всего за семестр	144.0	32	-	32	-	2	-	-	-	0.5	44	33.5	
	Итого за семестр	144.0	32	-	32	2	-	-	-	0.5	77.5			

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. 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 ΔT .. 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 HeII. 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 теплопереноса.. 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. Решение уравнения сохранения энергии в интегральной формулировке для задач интенсивного испарения и конденсации в рамках механики сплошных сред;
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 заперении конденсации из парогазовой среды;
8. Испарение и конденсация при наличии неконденсируемых компонентов;
9. Определение плотности потока массы при интенсивной конденсации с помощью приближенного соотношения, полученного на базе молекулярно-кинетической теории. Сравнение с результатами применения традиционного подхода;
10. Приближенный метод определения теплопереноса через слой разреженного газа при произвольных числах Кнудсена. Примеры применения для наноразмерных систем;
11. Законы сохранения в виде выражений молекулярно-кинетической теории. Расчет

- теплового потока для свободномолекулярного предела;
12. Применение законов сохранения в дифференциальной форме для решения задачи о конденсации чистого пара на поверхности;
 13. Применение методов молекулярной динамики для задач энерго-массопереноса в двухфазных системах;
 14. Предельные значения коэффициентов конденсации и удельных потоков массы;
 15. Влияние коэффициентов испарения и конденсации. Способ пересчета результатов решения задачи об интенсивной конденсации;
 16. Применение уравнения Рэлея для решения задачи о схлопывании парогазового пузыря при сонолюминесценции. Приближенное описание явления формирования ударной волны внутри пузыря.

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	
Знать:							
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
Уметь:							
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
применять современные методы исследования, проводить технические испытания и (или) научные эксперименты;	ИД-3ПК-1	+	+	+			Контрольная работа/Расчет термических сопротивлений при испарении и конденсации

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