

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ТЕПЛОФИЗИКИ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/423-573.1

от 20.04.2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ТЕОРИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.05.01 Ядерные реакторы и материалы

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
6	3-4	108- 144	30	30	15	6-42	0	Э
7	4	144	32	16	16	26	0	Э
Итого	7-8	252- 288	62	46	31	0	32-68	0

## АННОТАЦИЯ

Целями преподавания данной дисциплины являются:

- 1) более глубокое и полное изложение современной теории тепломассообмена;
- 2) привитие у студентов навыков применения результатов теории в практических расчетах тепло- и массообменных процессов, происходящих в ядерных энергетических установках (ЯЭУ).

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями преподавания данной дисциплины являются:

- 1) более глубокое и полное изложение современной теории тепломассообмена;
- 2) привитие у студентов навыков применения результатов теории в практических расчетах тепло- и массообменных процессов, происходящих в ядерных энергетических установках (ЯЭУ).

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Для освоения данной дисциплины требуется знание дисциплин: «Химия», «Основы термодинамики и теплопередачи», «Общая физика».

Знания, полученные при изучении дисциплины, также помогут студентам в научно-исследовательской работе и дипломном проектировании, а также в дальнейшей профессиональной деятельности.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках	Атомный ледокольный флот Атомные электрические станции Плавающая АЭС Сфера	ПК-1 [1] - способен создавать теоретические и математические модели, описывающие нейтронно-физические процессы в реакторах,	З-ПК-1[1] - Знать нейтронно-физические процессы в реакторах, процессы гидродинамики и тепломассопереноса в

	<p>научных исследований в области ядерной физики и технологий</p>	<p>процессы гидродинамики и теплопереноса в активных зонах или воздействие ионизирующего излучения на материалы, человека и объекты окружающей среды, системы учета, контроля ядерных материалов</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078</p>	<p>активных зонах или воздействие ионизирующего излучения на материалы, человека и объекты окружающей среды, системы учета, контроля ядерных материалов ; У-ПК-1[1] - Уметь создавать теоретические и математические модели в профессиональной области ; В-ПК-1[1] - Владеть навыками работы с современными расчетными программными средствами</p>
<p>Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках</p>	<p>Атомный ледокольный флот Атомные электрические станции Плавучая АЭС Сфера научных исследований в области ядерной физики и технологий</p>	<p>ПК-2 [1] - способен к созданию новых методов расчета современных реакторных установок и физических устройств, методов исследования теплофизических процессов и свойств реакторных материалов и теплоносителей; разработке новых систем преобразования тепловой и ядерной энергии в электрическую, методов и методик оценки количественных характеристик ядерных материалов</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078</p>	<p>З-ПК-2[1] - Знать методы исследования и расчета процессов, происходящих в реакторных установках ; У-ПК-2[1] - Уметь рассчитывать и проводить исследования процессов, протекающих в реакторных установках ; В-ПК-2[1] - Владеть навыками применения информационных технологий при разработке новых установок, материалов и приборов</p>
<p>Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках</p>	<p>Атомный ледокольный флот Атомные электрические станции Плавучая АЭС Сфера</p>	<p>ПК-3 [1] - способен использовать фундаментальные законы в области физики атомного ядра и частиц, ядерных</p>	<p>З-ПК-3[1] - Знать основные законы в области физики атомного ядра и частиц, ядерных реакторов,</p>

	научных исследований в области ядерной физики и технологий	реакторов, термодинамики, гидродинамики и теплопереноса в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза идей, творческого самовыражения  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078	термодинамики, гидродинамики и теплопереноса ; У-ПК-3[1] - Уметь применять основные законы в области физики атомного ядра и частиц, ядерных реакторов, термодинамики, гидродинамики и теплопереноса практической деятельности и исследовательской работе; В-ПК-3[1] - Владеть навыками анализа, синтеза и нахождения закономерностей при обработке экспериментальных данных
--	--	--	---

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (В18)	Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (В19)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для: - формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их

		<p>вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед;</li> <li>- формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.</li> </ul>
--	--	---

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>6 Семестр</i>						
1	Основные механизмы и законы переноса тепла и массы. Дифференциальные уравнения теплообмена. Стационарная теплопроводность и диффузия..	1-8	15/15/8		25	КИ-8	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, З-ПК-2, У-

							ПК-2, В- ПК-2, 3-ПК- 3, У- ПК-3, В- ПК-3
2	Нестационарные процессы теплопроводности и диффузии. Введение в теорию конвективного теплообмена. Пограничный слой.	9-15	15/15/7		25	КИ-15	3-ПК-1, У- ПК-1, В- ПК-1, 3-ПК-2, У- ПК-2, В- ПК-2, 3-ПК-3, У- ПК-3, В- ПК-3
	<i>Итого за 6 Семестр</i>		30/30/15		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 6 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-1, У- ПК-1, В- ПК-1, 3-ПК-2, У- ПК-2, В- ПК-2, 3-ПК-3, У- ПК-3, В- ПК-3
	<i>7 Семестр</i>						
1	Конвективный теплообмен в однофазной среде в условиях свободного и вынужденного	1-8	16/8/8		25	КИ-8	3-ПК-1, У- ПК-1, В-

	движения.						ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3
2	Теплообмен при фазовых превращениях. Теплообмен излучением.	9-15	16/8/8		25	КИ-15	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		32/16/16		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 7 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

<b>Обозначение</b>	<b>Полное наименование</b>
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Неделя	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>6 Семестр</i>	30	30	15
1-8	<b>Основные механизмы и законы переноса тепла и массы. Дифференциальные уравнения теплообмена. Стационарная теплопроводность и диффузия..</b>	15	15	8
1 - 2	<b>Теплообмен при ламинарном течении жидкости в каналах</b> Общая характеристика и границы существования ламинарного режима течения жидкости в каналах. Критическое число Рейнольдса. Дифференциальное уравнение энергии и условия однозначности. Характеристика теплообмена на начальном термическом участке. Значения числа Нуссельта на участке стабилизированного теплообмена. Определение среднего по длине канала коэффициента теплоотдачи.ное описание пункта	Всего аудиторных часов		
		3	3	2
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Турбулентный перенос в потоке жидкости</b> Основные закономерности турбулентного переноса количества движения и тепла. Коэффициенты турбулентного переноса. Дифференциальные уравнения движения и энергии турбулентного потока. Турбулентный пограничный слой на пластине. Гидродинамическая теория теплообмена (аналогия Рейнольдса).	Всего аудиторных часов		
		3	3	2
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	<b>Теплоотдача при турбулентном течении жидкости в каналах</b> Профили скорости и температуры в турбулентном потоке жидкости. Методы решения задач теплообмена при турбулентном течении в каналах. Формулы для расчета теплоотдачи к жидкостям с умеренными числами Прандтля. Теплообмен жидких металлов. Влияние зависимости физических свойств жидкости от температуры на теплоотдачу. Расчет теплоотдачи в трубах некруглого поперечного сечения. Теплоотдача при продольном обтекании пучков стержней. Методы интенсификации теплообмена в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов.	Всего аудиторных часов		
		3	3	2
		Онлайн		
		0	0	0



7 - 8	<b>Теплообмен при поперечном обтекании труб</b> Общая картина движения жидкости при поперечном обтекании труб. Влияние числа Рейнольдса на характер обтекания, отрыв пограничного слоя. Изменение коэффициента теплоотдачи по окружности трубы. Теплообмен при поперечном обтекании коридорных и шахматных пучков труб. Основные факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи. Расчетные рекомендации.	Всего аудиторных часов		
		3	3	1
		Онлайн		
		0	0	0
9 - 10	<b>Теплообмен при естественной конвекции</b> Естественная конвекция на поверхности теплообмена в неограниченном объеме жидкости. Расчет теплоотдачи при ламинарной естественной конвекции около вертикальной нагреваемой пластины. Теплоотдача при турбулентном режиме естественной конвекции. Теплоотдача при естественной конвекции в ограниченном объеме.	Всего аудиторных часов		
		3	3	1
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	<b>Нестационарные процессы теплопроводности и диффузии. Введение в теорию конвективного теплообмена. Пограничный слой.</b>	15	15	7
11	<b>Теплообмен при кипении жидкости в большом объеме</b> Условия зарождения паровой фазы в перегретой жидкости. Критический радиус парового зародыша. Роль твердой стенки при парообразовании. Закономерности роста и отрыва паровых пузырей. Теплообмен при кипении жидкости в большом объеме. Режимы кипения. Основные факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи. Кризисы теплоотдачи и их природа. Расчет критической плотности теплового потока.	Всего аудиторных часов		
		3	3	2
		Онлайн		
		0	0	0
12	<b>Теплообмен при кипении в вынужденном потоке</b> Параметры двухфазного потока. Режимы течения и структура двухфазных смесей в каналах. Элементы гидродинамики двухфазных потоков, гидравлические сопротивления. Теплообмен при кипении в трубах. Кризисы теплообмена в условиях вынужденного течения. Расчетные рекомендации.	Всего аудиторных часов		
		3	3	2
		Онлайн		
		0	0	0
13	<b>Теплообмен при конденсации</b> Пленочная и капельная конденсация. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной стенке. Ламинарный режим течения пленки конденсата, формула Нуссельта. Турбулентный режим. Влияние некоторых факторов на коэффициент теплоотдачи при конденсации. Интенсификация теплообмена при конденсации.	Всего аудиторных часов		
		3	3	1
		Онлайн		
		0	0	0
14	<b>Теплообмен излучением</b> Основные понятия и определения. Интегральное и монохроматическое излучение. Понятие абсолютно черного тела. Серые тела. Законы теплового излучения. Радиационные характеристики поверхностей. Уравнения лучистого теплообмена между телами. Угловые коэффициенты излучения. Теплообмен между плоскими параллельными поверхностями. Влияние экранов на теплообмен излучением. Лучистый теплообмен между поверхностями, произвольно расположенными в	Всего аудиторных часов		
		3	3	1
		Онлайн		
		0	0	0

	пространстве. Расчет лучистого теплообмена в замкнутой системе двух тел.			
15	<b>Заключительная лекция</b> Актуальные задачи современной теории теплопереноса в тепловой и ядерной энергетике.	Всего аудиторных часов		
		3	3	1
		Онлайн		
	7 Семестр	0	0	0
1-8	<b>Конвективный теплообмен в однофазной среде в условиях свободного и вынужденного движения.</b>	16	8	8
1 - 2	<b>Общая характеристика процессов теплопереноса.</b> Основные понятия и определения. Механизмы переноса импульса, тепла и массы в твердых телах, жидкостях и газах. Перенос энергии и вещества в условиях фазовых и химических превращений. Феноменологический и кинетический методы изучения явлений переноса.	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Основные законы теплопереноса.</b> Эмпирические законы переноса количества движения, тепла и массы (законы Ньютона, Био – Фурье, Фика). Коэффициенты переноса. Числа Прандтля, Шмидта, Льюиса – Семенова.	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	<b>Дифференциальные уравнения теплопереноса.</b> Уравнения неразрывности, движения вязкой жидкости, переноса вещества и энергии в многокомпонентной среде. Условия однозначности для процессов переноса. Закон Ньютона – Рихмана. Коэффициенты тепло- и массоотдачи.	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	<b>Стационарная теплопроводность и диффузия.</b> Дифференциальные уравнения теплопереноса в объеме неподвижных сред. Начальные и граничные условия для процессов теплопроводности и диффузии. Методы решения стационарных задач.	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	<b>Теплообмен при фазовых превращениях. Теплообмен излучением.</b>	16	8	8
9 - 10	<b>Некоторые задачи стационарной теплопроводности и диффузии.</b> Теплопроводность и диффузия в телах простой геометрической формы (плоская, цилиндрическая и шаровая стенки). Коэффициенты тепло- и массопередачи. Термические и диффузионные сопротивления. Число Био. Особенности температурных полей в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов. Теплопроводность тел с пренебрежимо малым внутренним термическим сопротивлением. Теплопередача через ребристые стенки. Методы интенсификации теплоотдачи от тепловыделяющих элементов ядерных реакторов.	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
11	<b>Нестационарные процессы теплопроводности и диффузии.</b> Теплопроводность полугограниченного массива. Нагревание (охлаждение) неограниченной пластины, бесконечно длинного цилиндра, шара. Нагревание (охлаждение) тел конечных размеров. Регулярные режимы теплопроводности. Теплопроводность в системах с подвижными границами. Общая сравнительная	Всего аудиторных часов		
		3	2	2
		Онлайн		
		0	0	0

	характеристика методов решения нестационарных задач теплопроводности и диффузии.			
12 - 13	<b>Введение в теорию конвективного теплообмена.</b> Общая характеристика и методы изучения процессов конвективного теплопереноса. Понятие о подобии физических явлений. Условия подобия. Критерии подобия и уравнения подобия. Прямая и обратная теоремы метода подобия. Метод анализа размерностей физических величин, П-теорема. Моделирование процессов теплообмена.	Всего аудиторных часов		
		3	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
14	<b>Пограничный слой.</b> Понятие и основные свойства динамического, теплового, диффузионного пограничного слоя. Дифференциальные и интегральные уравнения переноса количества движения, тепла и массы в пограничном слое. Условия однозначности. Тройная аналогия. Теплоотдача при продольном обтекании пластины ламинарным потоком. Случаи умеренных и очень малых значений числа Прандтля.	Всего аудиторных часов		
		3	1	1
		Онлайн		
		0	0	0
15	<b>Заключительная лекция.</b> Обзор результатов современной теории теплопроводности и диффузии и их применение при решении практических задач в тепловой и ядерной энергетике.	Всего аудиторных часов		
		3	1	1
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

#### ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
	<b>Занятия на лабораторных стендах:</b> 1. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном движении воды в трубе (турбулентное течение). 2. Определение теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтального цилиндра. 3. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции воздуха на поверхности цилиндра различной ориентации. 4. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции

	<p>в нестационарном режиме.</p> <p>5. Теплоотдача при кипении воды в большом объеме.</p> <p>6. Определение критической плотности теплового потока при вынужденном движении недогретой до температуры насыщения воды в кольцевом канале.</p> <p>7. Определение коэффициента теплового излучения (степени черноты) твердого тела калориметрическим методом.</p>
	<p><b>Занятия с применением ЭВМ:</b></p> <p>1. Теплообмен при ламинарном течении жидкости вдоль пластины.</p> <p>2. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в круглых трубах.</p> <p>3. Теплообмен при ламинарной естественной конвекции на вертикальной пластине.</p> <p>4. Теплообмен при пленочной конденсации пара на вертикальной пластине.</p> <p>5. Теплообмен излучением в замкнутой системе тел.</p>
	<i>7 Семестр</i>
1	<p><b>1. Распределение температур в плоской, цилиндрической, шаровой стенках с переменным коэффициентом теплопроводности в стационарных условиях (граничные условия 1-го рода).</b></p> <p>1. Распределение температур в плоской, цилиндрической, шаровой стенках с переменным коэффициентом теплопроводности в стационарных условиях (граничные условия 1-го рода).</p>
2 - 3	<p><b>2. Стационарная теплопроводность в двухслойной стенке (плоской, цилиндрической, шаровой) без внутренних источников тепла (граничные условия 1-го и 3-го рода). Критическая толщина тепловой изоляции.</b></p> <p>2. Стационарная теплопроводность в двухслойной стенке (плоской, цилиндрической, шаровой) без внутренних источников тепла (граничные условия 1-го и 3-го рода). Критическая толщина тепловой изоляции.</p>
4	<p><b>3. Передача тепла через ребра. Эффективность ребер.</b></p> <p>3. Передача тепла через ребра. Эффективность ребер.</p>
5 - 6	<p><b>4. Стационарная теплопроводность в плоской и цилиндрической стенках с внутренними источниками тепла (граничные условия 3-го рода).</b></p> <p>4. Стационарная теплопроводность в плоской и цилиндрической стенках с внутренними источниками тепла (граничные условия 3-го рода).</p>
7 - 8	<p><b>5. Распределение температуры в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов (твэлы с дисперсионным топливом, твэлы с диоксидом урана) в стационарных режимах.</b></p> <p>5. Распределение температуры в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов (твэлы с дисперсионным топливом, твэлы с диоксидом урана) в стационарных режимах.</p>
9	<b>6. Двумерные стационарные задачи</b>

	<b>теплопроводности.</b> 6. Двумерные стационарные задачи теплопроводности.
10	<b>7. Нестационарная теплопроводность в полуограниченном теле (граничные условия 1-го, 2-го, 3-го рода).</b> 7. Нестационарная теплопроводность в полуограниченном теле (граничные условия 1-го, 2-го, 3-го рода).
11 - 12	<b>8. Нестационарная теплопроводность неограниченной пластины, бесконечно длинного цилиндра, шара (граничные условия 3-го рода).</b> 8. Нестационарная теплопроводность неограниченной пластины, бесконечно длинного цилиндра, шара (граничные условия 3-го рода).
13	<b>9. Нестационарные тепловые процессы в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов.</b> 9. Нестационарные тепловые процессы в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов.
14	<b>10. Теплопередача тел при пренебрежимо малом внутреннем термическом сопротивлении.</b> 10. Теплопередача тел при пренебрежимо малом внутреннем термическом сопротивлении.
15	<b>11. Многомерные задачи теплопроводности.</b> 11. Многомерные задачи теплопроводности.

#### ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
1 - 3	<b>1. Теплообмен при внешнем обтекании тел.</b> 1. Теплообмен при внешнем обтекании тел.
4 - 6	<b>2. Теплообмен при течении жидкости в каналах.</b> 2. Теплообмен при течении жидкости в каналах.
7 - 9	<b>3. Теплообмен при естественной конвекции.</b> 3. Теплообмен при естественной конвекции.
10 - 12	<b>4. Теплообмен при кипении и конденсации.</b> 4. Теплообмен при кипении и конденсации.
13 - 15	<b>5. Теплообмен излучением.</b> 5. Теплообмен излучением.
	<i>7 Семестр</i>
1 - 2	<b>1. Процессы стационарной теплопроводности в плоской стенке при отсутствии внутренних источников тепла.</b> 1. Процессы стационарной теплопроводности в плоской стенке при отсутствии внутренних источников тепла.
3 - 4	<b>2. Процессы стационарной теплопроводности в цилиндрической и сферической стенках при отсутствии внутренних источников тепла.</b> 2. Процессы стационарной теплопроводности в цилиндрической и сферической стенках при отсутствии внутренних источников тепла.
5 - 8	<b>3. Процессы стационарной теплопроводности в телах с</b>

	<b>внутренним тепловыделением.</b> 3. Процессы стационарной теплопроводности в телах с внутренним тепловыделением.
9 - 10	<b>4. Нестационарные процессы теплопроводности.</b> 4. Нестационарные процессы теплопроводности.
11 - 13	<b>5. Теплопроводность тел с малым числом Био.</b> 5. Теплопроводность тел с малым числом Био.
14 - 15	<b>6. Теплообмен в ламинарном пограничном слое на пластине.</b> 6. Теплообмен в ламинарном пограничном слое на пластине.

## ТЕМЫ СЕМИНАРОВ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
1 - 2	<b>Теплообмен при ламинарном течении жидкости в каналах</b> Введите здесь подробОбщая характеристика и границы существования ламинарного режима течения жидкости в каналах. Критическое число Рейнольдса. Дифференциальное уравнение энергии и условия однозначности. Характеристика теплообмена на начальном термическом участке. Значения числа Нуссельта на участке стабилизированного теплообмена. Определение среднего по длине канала коэффициента теплоотдачи.ное описание пункта
3 - 4	<b>Турбулентный перенос в потоке жидкости</b> Основные закономерности турбулентного переноса количества движения и тепла. Коэффициенты турбулентного переноса. Дифференциальные уравнения движения и энергии турбулентного потока. Турбулентный пограничный слой на пластине. Гидродинамическая теория теплообмена (аналогия Рейнольдса).
5 - 6	<b>Теплоотдача при турбулентном течении жидкости в каналах</b> Профили скорости и температуры в турбулентном потоке жидкости. Методы решения задач теплообмена при турбулентном течении в каналах. Формулы для расчета теплоотдачи к жидкостям с умеренными числами Прандтля. Теплообмен жидких металлов. Влияние зависимости физических свойств жидкости от температуры на теплоотдачу. Расчет теплоотдачи в трубах некруглого поперечного сечения. Теплоотдача при продольном обтекании пучков стержней. Методы интенсификации теплообмена в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов.
7 - 8	<b>Теплообмен при поперечном обтекании труб</b> Общая картина движения жидкости при поперечном обтекании труб. Влияние числа Рейнольдса на характер обтекания, отрыв пограничного слоя. Изменение коэффициента теплоотдачи по окружности трубы.

	Теплообмен при поперечном обтекании коридорных и шахматных пучков труб. Основные факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи. Расчетные рекомендации.
9 - 10	<b>Теплообмен при естественной конвекции</b> Естественная конвекция на поверхности теплообмена в неограниченном объеме жидкости. Расчет теплоотдачи при ламинарной естественной конвекции около вертикальной нагреваемой пластины. Теплоотдача при турбулентном режиме естественной конвекции. Теплоотдача при естественной конвекции в ограниченном объеме.
11	<b>Теплообмен при кипении жидкости в большом объеме</b> Условия зарождения паровой фазы в перегретой жидкости. Критический радиус парового зародыша. Роль твердой стенки при парообразовании. Закономерности роста и отрыва паровых пузырей. Теплообмен при кипении жидкости в большом объеме. Режимы кипения. Основные факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи. Кризисы теплоотдачи и их природа. Расчет критической плотности теплового потока.
12	<b>Теплообмен при кипении в вынужденном потоке</b> Параметры двухфазного потока. Режимы течения и структура двухфазных смесей в каналах. Элементы гидродинамики двухфазных потоков, гидравлические сопротивления. Теплообмен при кипении в трубах. Кризисы теплообмена в условиях вынужденного течения. Расчетные рекомендации.
13	<b>Теплообмен при конденсации</b> Пленочная и капельная конденсация. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной стенке. Ламинарный режим течения пленки конденсата, формула Нуссельта. Турбулентный режим. Влияние некоторых факторов на коэффициент теплоотдачи при конденсации. Интенсификация теплообмена при конденсации.
14	<b>Теплообмен излучением</b> Основные понятия и определения. Интегральное и монохроматическое излучение. Понятие абсолютно черного тела. Серые тела. Законы теплового излучения. Радиационные характеристики поверхностей. Уравнения лучистого теплообмена между телами. Угловые коэффициенты излучения. Теплообмен между плоскими параллельными поверхностями. Влияние экранов на теплообмен излучением. Лучистый теплообмен между поверхностями, произвольно расположенными в пространстве. Расчет лучистого теплообмена в замкнутой системе двух тел.
15	<b>Заключительная лекция</b> Актуальные задачи современной теории тепломассопереноса в тепловой и ядерной энергетике.
	<i>7 Семестр</i>
1 - 2	<b>Общая характеристика процессов тепломассопереноса.</b>

	Основные понятия и определения. Механизмы переноса импульса, тепла и массы в твердых телах, жидкостях и газах. Перенос энергии и вещества в условиях фазовых и химических превращений. Феноменологический и кинетический методы изучения явлений переноса.
3 - 4	<b>Основные законы теплопереноса.</b> Эмпирические законы переноса количества движения, тепла и массы (законы Ньютона, Био – Фурье, Фика). Коэффициенты переноса. Числа Прандтля, Шмидта, Льюиса – Семенова.
5 - 6	<b>Дифференциальные уравнения теплопереноса.</b> Уравнения неразрывности, движения вязкой жидкости, переноса вещества и энергии в многокомпонентной среде. Условия однозначности для процессов переноса. Закон Ньютона – Рихмана. Коэффициенты тепло- и массоотдачи.
7 - 8	<b>Стационарная теплопроводность и диффузия.</b> Дифференциальные уравнения теплопереноса в объеме неподвижных сред. Начальные и граничные условия для процессов теплопроводности и диффузии. Методы решения стационарных задач.
9 - 10	<b>Некоторые задачи стационарной теплопроводности и диффузии.</b> Теплопроводность и диффузия в телах простой геометрической формы (плоская, цилиндрическая и шаровая стенки). Коэффициенты тепло- и массопередачи. Термические и диффузионные сопротивления. Число Био. Особенности температурных полей в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов. Теплопроводность тел с пренебрежимо малым внутренним термическим сопротивлением. Теплопередача через ребристые стенки. Методы интенсификации теплоотдачи от тепловыделяющих элементов ядерных реакторов.
11	<b>Нестационарные процессы теплопроводности и диффузии.</b> Теплопроводность полуограниченного массива. Нагревание (охлаждение) неограниченной пластины, бесконечно длинного цилиндра, шара. Нагревание (охлаждение) тел конечных размеров. Регулярные режимы теплопроводности. Теплопроводность в системах с подвижными границами. Общая сравнительная характеристика методов решения нестационарных задач теплопроводности и диффузии.
12 - 13	<b>Введение в теорию конвективного теплообмена.</b> Общая характеристика и методы изучения процессов конвективного теплопереноса. Понятие о подобии физических явлений. Условия подобия. Критерии подобия и уравнения подобия. Прямая и обратная теоремы метода подобия. Метод анализа размерностей физических величин, П-теорема. Моделирование процессов теплообмена.
14	<b>Пограничный слой.</b> Понятие и основные свойства динамического, теплового,



	диффузионного пограничного слоя. Дифференциальные и интегральные уравнения переноса количества движения, тепла и массы в пограничном слое. Условия однозначности. Тройная аналогия. Теплоотдача при продольном обтекании пластины ламинарным потоком. Случаи умеренных и очень малых значений числа Прандтля.
15	<b>Заключительная лекция.</b> Обзор результатов современной теории теплопроводности и диффузии и их применение при решении практических задач в тепловой и ядерной энергетике.

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс предусматривает широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий (лекции, презентации, встречи с заведующими кафедр и ведущими учеными, разбор конкретных ситуаций, тестирование, выполнение и защита домашнего задания) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)	Аттестационное мероприятие (КП 2)
ПК-1	З-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-2	З-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-3	З-ПК-3	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-3	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-3	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15

### Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ I-70 Heat Conduction : Third Edition, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,, 2009
2. ЭИ М 67 Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок : учебное пособие, Москва: Физматлит, 2010
3. ЭИ П63 Оптимизация распределения энерговыделения в активной зоне ядерного реактора : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
4. ЭИ Л 69 Примеры и задачи по тепломассообмену : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022

5. ЭИ Т34 Теплообмен в ядерных энергетических установках : сборник задач: учебное пособие для вузов, В. В. Архипов [и др.] ; ред. В. И. Деев, Москва: НИЯУ МИФИ, 2010
6. 532 М67 Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок : , О. В. Митрофанова, Москва: Физматлит, 2010
7. 621.039 К43 Тепломассообмен в ядерных энергетических установках : учебное пособие для вузов, П. Л. Кириллов, Г. П. Богословская, Москва: ИздАТ, 2008

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 621.039 П63 Оптимизация распределения энерговыделения в активной зоне ядерного реактора : учебное пособие, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
2. 621.039 Ф50 Физико-технические основы современной ядерной энергетики. Перспективы и экологические аспекты : учебное пособие, Долгопрудный: Интеллект, 2014
3. 621.039 Т34 Теплообмен в ядерных энергетических установках : учеб. пособие для вузов, Б. С. Петухов [et al.], М.: МЭИ, 2003
4. 621.039 З-15 Задачник по теплообмену в ЯЭУ : Учеб. пособие, В. В. Архипов [и др.], М.: МИФИ, 1992
5. 621.039 Т34 Теплообмен в ядерных энергетических установках : сборник задач, В. В. Архипов [и др.] ; ред. : В. И. Деев, Москва: НИЯУ МИФИ, 2010
6. 536 Д26 Решение задач теплообмена на ЭВМ : Пособие к лаб. практикуму по курсу "Теория тепломассопереноса", В. И. Деев, И. Г. Меринов, М.: МИФИ, 2000
7. 536 И85 Теплопередача : Учебник для вузов, В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел, М.: Энергоиздат, 1981
8. 621.039 Д26 Теплопередача в ЯЭУ : учеб. пособие для вузов, В.И.Деев, Москва: МИФИ, 2004
9. 536 Л12 Лабораторный практикум по курсу "Теория теплообмена" : Учеб. пособие, Деев В.И., Корсун А.С., Одинцов А.А., Похвалов Ю.Е., М.: МИФИ, 1993
10. 621.039 К43 Тепломассообмен в ядерных энергетических установках : , П. Л. Кириллов, Г. П. Богословская, Москва: Энергоатомиздат, 2000
11. 621.039 К43 Тепломассообмен в ядерных энергетических установках : учебное пособие для вузов, П. Л. Кириллов, Г. П. Богословская, Москва: ИздАТ, 2008
12. 536 Т33 Теория тепломассообмена : Учебник для вузов, Под ред. А.И. Леонтьева, М.: Высш. школа, 1979
13. 536 Э41 Экспериментальные методы изучения процессов теплопередачи : (учебное пособие к лабораторному практикуму по курсу "Теория теплообмена"), ред. : В. И. Деев, Москва: МИФИ, 2008

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

## LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. World-nuclear (<http://world-nuclear.org/>)
2. Росатом ([www.rosatom.ru](http://www.rosatom.ru))
3. Росэнергоатом (<http://www.rosenergoatom.ru>)
4. Урановый холдинг АРМЗ (<http://www.armz.ru>)
5. ТВЭЛ (<http://www.tvel.ru>)
6. ВЭБ элемент (<http://www.webelements.com>)

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

## **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

При изучении курса необходимо твердо усвоить основные механизмы и законы конвективного теплопереноса, хорошо знать критерии, определяющие перенос тепла и массы в тех или иных конкретных условиях (при естественном или вынужденном движении однофазной среды, при наличии фазовых превращений и т.д.). Используя в расчетах эмпирические формулы, нужно знать, что рекомендуемые зависимости справедливы только в том диапазоне изменения параметров, в котором они были подтверждены опытными данными. При анализе процессов кипения жидкости на поверхности нагрева очень важным является понятие критического теплового потока, так как в случае превышения его величины, как правило, происходит разрушение теплоотдающей стенки.

При выполнении расчетных работ следует уяснить поставленную задачу, правильно сформулировать ее математическое описание, знать способы решения записанной системы уравнений. При экспериментальном исследовании теплового процесса полезно подробно изучить методы измерения необходимых теплофизических величин или параметров процесса, нужно знать основные характеристики применяемых средств измерений и приборов.

## **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Лекционный курс строится по следующему плану: сначала вводятся и обсуждаются основные понятия и исходные положения, излагаются основные законы и уравнения. Потом рассматриваются методы, с помощью которых разбираются важнейшие приложения.

С целью выработки профессиональных компетенций студентов на лекциях и семинарских занятиях используется интерактивная форма проведения лекционных (20%) и семинарских занятий (75%). Активная форма проведения лекционных занятий предполагает, в частности, что студенты углубленно изучают по рекомендуемой преподавателем литературе те разделы лекционного курса, которые не рассматриваются детально на лекциях, но необходимы для дальнейшего изучения курса.

Автор(ы):

Корсун Александр Сергеевич, к.т.н., доцент

Рецензент(ы):

доцент Харитонов В.С., доцент Куценко К.В.,  
профессор Митрофанова О.В.