

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

Направление подготовки/специальность: 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Наименование образовательной программы: Тепловые электрические станции

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная


**Рабочая программа дисциплины**  
**ТЕПЛОМАССООБМЕН**

<b>Блок:</b>	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
<b>Часть образовательной программы:</b>	Обязательная
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	Б1.О.21
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	4 семестр - 5; 5 семестр - 5; всего - 10
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	360 часов
<b>Лекции</b>	4 семестр - 32 часа; 5 семестр - 32 часа; всего - 64 часа
<b>Практические занятия</b>	4 семестр - 32 часа; 5 семестр - 32 часа; всего - 64 часа
<b>Лабораторные работы</b>	4 семестр - 16 часов; 5 семестр - 16 часов; всего - 32 часа
<b>Консультации</b>	4 семестр - 2 часа; 5 семестр - 2 часа; всего - 4 часа
<b>Самостоятельная работа</b>	4 семестр - 97,5 часа; 5 семестр - 97,5 часа; всего - 195,0 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> Тестирование Контрольная работа Лабораторная работа Расчетно-графическая работа	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
Экзамен	4 семестр - 0,5 часа;
Экзамен	5 семестр - 0,5 часа;
	всего - 1,0 час

**Москва 2024**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**


Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Шацких Ю.В.
	Идентификатор	R6ca75b8e-ShatskikhYV-f045f12f

Ю.В. Шацких


**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Шацких Ю.В.
	Идентификатор	R6ca75b8e-ShatskikhYV-f045f12f

Ю.В. Шацких

Заведующий выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Шацких Ю.В.
	Идентификатор	R6ca75b8e-ShatskikhYV-f045f12f

Ю.В. Шацких

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** освоение основных положений теории тепло- и массообмена, приобретение знаний о закономерностях распространения теплоты в различных средах, формирование умений рассчитывать и анализировать тепловые процессы в теплотехнических устройствах

### Задачи дисциплины

- освоение методов расчета температурных полей, тепловых потоков и потоков вещества в элементах теплотехнических и теплотехнологических установок;
- изучение процессов тепло- и массообмена, физико-математических моделей этих процессов;
- развитие мышления и практических навыков, приобретенных обучающимися при изучении дисциплин математического и естественнонаучного цикла, с ориентацией на профессию.

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
ОПК-4 Способен демонстрировать применение основных способов получения, преобразования, транспорта и использования теплоты в теплотехнических установках и системах	ИД-3 <sub>ОПК-4</sub> Демонстрирует понимание основных законов теплообмена и применяет их для расчетов элементов теплотехнических установок и систем	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- закономерности теплообмена при фазовых превращениях;</li><li>- терминологию теплообмена, физический смысл и размерности основных величин, используемых в теплообмене;</li><li>- перенос теплоты в жидких и газообразных телах, законы сохранения и превращения энергии, законы и основные физико-математические модели процессов переноса теплоты и массы применительно к процессам передачи и трансформации теплоты;</li><li>- основные положения и уравнения теплового расчета теплообменных аппаратов;</li><li>- основные законы теплового излучения, теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой, теплообмен излучением в поглощающих и излучающих средах;</li><li>- основные законы массо- и теплообмена в двухфазных средах;</li><li>- основные положения теории теплопроводности, теплопроводность при стационарном и нестационарном режиме.</li></ul> <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- рассчитывать теплообмен излучением в системе тел, заполненных излучающей и поглощающей средой;</li></ul>

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- проводить теплотехнические эксперименты с целью изучения процессов переноса теплоты в энергетических и теплотехнологических установках;</li> <li>- проводить теплотехнические эксперименты с целью изучения калорических и переносных свойства рабочих веществ;</li> <li>- выполнять теплогидравлический расчёт теплообменных аппаратов;</li> <li>- рассчитывать температурные поля и тепловые потоки в элементах конструкции тепловых и теплотехнологических установок с использованием справочной литературы по теплофизическим свойствам твердых тел, жидкостей и газов.</li> </ul>

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Тепловые электрические станции (далее – ОПОП), направления подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать основные положения физики, высшей математики, гидрогазодинамики
- уметь выполнять эскизы и чертежи деталей теплоэнергетического оборудования по требованиям ЕСКД

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 10 зачетных единиц, 360 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания
				Контактная работа							СР			
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль	
КПР	ГК	ИККП	ТК											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Введение в теплообмен	14	4	4	-	2	-	-	-	-	-	8	-	<p><b><u>Подготовка домашнего задания:</u></b> Подготовка домашнего задания направлена на отработку умений решения профессиональных задач. Домашнее задание выдается студентам по изученному в разделе "Введение в теплообмен. Способы переноса теплоты. Основные определения, терминология" материалу. Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам.</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Для подготовки и освоения материала необходимо выучить термины и определения в рамках теплопроводности</p> <p><b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Введение в теплообмен. Способы переноса теплоты. Основные определения, терминология", подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [2], 7-23</p>
1.1	Способы переноса теплоты	7		2	-	1	-	-	-	-	-	4	-	
1.2	Основные определения, терминология	7		2	-	1	-	-	-	-	-	4	-	
2	Теплопроводность	64		14	8	14	-	-	-	-	-	28	-	<b><u>Подготовка к лабораторной работе:</u></b> Для

2.1	Математическое описание процесса теплопроводности	12		4	-	-	-	-	-	-	-	8	-	<p>подготовке к выполнению лабораторной работе необходимо предварительно изучить схему экспериментальной установки, методику проведения эксперимента, подготовить протокол измерений, а так же изучить методику обработки результатов экспериментов.</p> <p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Теплопроводность"</p> <p><b><u>Подготовка домашнего задания:</u></b> Подготовка домашнего задания направлена на отработку умений решения профессиональных задач. Домашнее задание выдается студентам по материалу, изученному в разделе "Теплопроводность". Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам.</p> <p><b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Теплопроводность", подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Теплопроводность"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 35-124 [2], 24-124 [4], 1-70 [5], 1-90 [6], 1-25,1-63 [7], 17-27, 33,50-54, 59-62, 70-85, 88,107-111, 114-122, 124</p>
2.2	Стационарная теплопроводность	30		6	4	8	-	-	-	-	-	12	-	
2.3	Нестационарная теплопроводность	22		4	4	6	-	-	-	-	-	8	-	

3	Теплообмен излучением	66		14	8	16	-	-	-	-	-	28	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Теплообмен излучением"</p> <p><b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Теплообмен излучением". Подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><b><u>Подготовка домашнего задания:</u></b> Подготовка домашнего задания направлена на отработку умений решения профессиональных задач. Домашнее задание выдается студентам по материалу, изученному в разделе "Теплообмен излучением". Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам.</p> <p><b><u>Подготовка к лабораторной работе:</u></b> Для подготовке к выполнению лабораторной работе необходимо предварительно изучить схему экспериментальной установки, методику проведения эксперимента, подготовить протокол измерений, а так же изучить методику обработки результатов экспериментов.</p> <p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Теплообмен излучением"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[1], 425-511  [2], 361-440  [3], 123-144  [4], 1-70  [6], 1-63, 67-94  [7], 425-441, 445-567, 471, 482-489, 491, 493-512</p>
3.1	Основные понятия и законы теплового излучения	16		4	-	4	-	-	-	-	-	8	-	
3.2	Теплообмен излучением между твердыми телами, разделенными прозрачной средой	32		6	8	6	-	-	-	-	-	12	-	
3.3	Расчет теплообмена излучением в системе тел, заполненной излучающей и поглощающей средой	18		4	-	6	-	-	-	-	-	8	-	

	Экзамен	36.0		-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5		
	Всего за семестр	180.0		32	16	32	-	2	-	-	0.5	64	33.5		
	Итого за семестр	180.0		32	16	32	2		-		0.5	97.5			
4	Конвективный теплообмен	60	5	14	8	12	-	-	-	-	-	26	-	<p><b><u>Подготовка к лабораторной работе:</u></b> Для подготовке к выполнению лабораторной работе необходимо предварительно изучить схему экспериментальной установки, методику проведения эксперимента, подготовить протокол измерений, а так же изучить методику обработки результатов экспериментов.</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Конвективный теплообмен"</p> <p><b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Конвективный теплообмен" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><b><u>Подготовка домашнего задания:</u></b> Подготовка домашнего задания направлена на отработку умений решения профессиональных задач. Домашнее задание выдается студентам по материалу, изученному в разделе "Конвективный теплообмен". Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам.</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[1], 126-300 [2], 125-262 [3], 34-79 [4], 1-70 [5], 1-90 [6], 1-25,1-63</p>	
4.1	Введение в конвективный теплообмен	4		2	-	-	-	-	-	-	-	-	2		-
4.2	Внешняя задача конвективного теплообмена	18		4	2	4	-	-	-	-	-	-	8		-
4.3	Конвективная теплоотдача при течении жидкости в трубах и каналах	18		4	2	4	-	-	-	-	-	-	8		-
4.4	Свободная конвекция	20		4	4	4	-	-	-	-	-	-	8		-



5	Теплообмен при фазовых превращениях	36		8	4	8	-	-	-	-	-	16	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Теплоотдача при фазовых превращениях"
5.1	Теплообмен при кипении	20		4	4	4	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b>
5.2	Теплообмен при конденсации пара	16		4	-	4	-	-	-	-	-	8	-	Повторение материала по разделу "Теплоотдача при фазовых превращениях" <b><u>Подготовка к лабораторной работе:</u></b> Для подготовке к выполнению лабораторной работе необходимо предварительно изучить схему экспериментальной установки, методику проведения эксперимента, подготовить протокол измерений, а так же изучить методику обработки результатов экспериментов. <b><u>Подготовка домашнего задания:</u></b> Подготовка домашнего задания направлена на отработку умений решения профессиональных задач. Домашнее задание выдается студентам по материалу, изученному в разделе "Теплоотдача при фазовых превращениях". Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам. <b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Теплоотдача при фазовых превращениях" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 301-370 [3], 80-101 [5], 1-90
6	Теплообменные аппараты	24		6	4	4	-	-	-	-	-	10	-	<b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> Задания ориентированы на решения минизаданий по

6.1	Общие сведения о теплообменных аппаратах	8		2	4	-	-	-	-	-	-	2	-	<p>разделу "Теплообменные аппараты". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения:</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Теплообменные аппараты"</p> <p><b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Теплообменные аппараты" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><b><u>Подготовка домашнего задания:</u></b> Подготовка домашнего задания направлена на отработку умений решения профессиональных задач. Домашнее задание выдается студентам по материалу, изученному в разделе "Теплообменные аппараты". Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам.</p> <p><b><u>Подготовка к лабораторной работе:</u></b> Для подготовке к выполнению лабораторной работе необходимо предварительно изучить схему экспериментальной установки, методику проведения эксперимента, подготовить протокол измерений, а так же изучить методику обработки результатов экспериментов.</p> <p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Теплообменные аппараты"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p>
6.2	Расчет теплообменных аппаратов	16		4	-	4	-	-	-	-	-	8	-	

													[1], 512-543 [2], 441-465 [3], 145-169
7	Основные понятия массообмена	24	4	-	8	-	-	-	-	-	12	-	<b><u>Подготовка домашнего задания:</u></b> Подготовка домашнего задания направлена на отработку умений решения профессиональных задач. Домашнее задание выдается студентам по материалу, изученному в разделе "Основные понятия массообмена". Дополнительно студенту необходимо изучить литературу и разобрать примеры выполнения подобных заданий. Проверка домашнего задания проводится по представленным письменным работам. <b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Основные понятия массообмена" <b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Изучение материала по разделу "Основные понятия массообмена" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 371-400 [3], 102-122
7.1	Основные понятия массообмена	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	
7.2	Массообмен в двухкомпонентных средах	12	2	-	4	-	-	-	-	-	6	-	
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	Всего за семестр	180.0	32	16	32	-	2	-	-	0.5	64	33.5	
	Итого за семестр	180.0	32	16	32	2	-	-	-	0.5	97.5		
	<b>ИТОГО</b>	<b>360.0</b>	-	<b>64</b>	<b>32</b>	<b>64</b>	<b>4</b>	-	-	<b>1.0</b>	<b>195.0</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. Введение в тепломассообмен

#### 1.1. Способы переноса теплоты

Способы тепло- и массопереноса: теплопроводность, конвекция, излучение, диффузия. Феноменологический метод изучения явлений тепло- и массообмена..

#### 1.2. Основные определения, терминология

Температурное поле, градиент температуры, тепловой поток, плотность теплового потока. Вектор плотности теплового потока. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности газов, жидкостей и твёрдых тел. Тепловое взаимодействие потока жидкости с обтекаемой поверхностью твердого тела. Закон Ньютона-Рихмана (теплоотдача). Теплопередача.

### 2. Теплопроводность

#### 2.1. Математическое описание процесса теплопроводности

Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Коэффициент температуропроводности..

#### 2.2. Стационарная теплопроводность

Перенос теплоты в плоской стенке при постоянном и переменном коэффициенте теплопроводности. Теплопередача через однослойную и многослойную плоскую стенку. Термические сопротивления. Коэффициент теплопередачи. Перенос теплоты в цилиндрической стенке при постоянном и переменном коэффициенте теплопроводности. Теплопередача через однослойную и многослойную цилиндрическую стенку. Критический диаметр тепловой изоляции. Выбор эффективной изоляции по её критическому диаметру. Температурное поле при наличии в теле источников теплоты (пластина, цилиндрический стержень). Оребрение поверхности нагрева как способ интенсификации процесса теплопередачи. Теплопередача через оребрённую стенку. Коэффициент эффективности ребра. Перенос теплоты по стержню (ребру). Тепловой поток с поверхности стержня (ребра).

#### 2.3. Нестационарная теплопроводность

Нестационарные задачи теплопроводности. Метод разделения переменных решения линейного уравнения теплопроводности (Фурье). Безразмерная форма и решение задачи о нестационарном температурном поле в охлаждаемой пластине. Число Био. Безразмерное время (число Фурье). Анализ решения. Температурное поле в процессе охлаждения (нагревания) бесконечно длинного цилиндра и некоторых тел конечных размеров. Задача об охлаждении (нагревании) полуограниченного тела как модель начального периода нестационарной теплопроводности тела произвольной формы. Регулярный режим нагрева (охлаждения) тела. Экспериментальное определение теплофизических свойств материалов методом регулярного режима. Теоремы Кондратьева.

### 3. Теплообмен излучением

#### 3.1. Основные понятия и законы теплового излучения

Физическая природа теплового излучения. Классификация потоков излучения. Формула Поляка. Интегральные и спектральные характеристики энергии излучения: поток, плотность потока и интенсивность излучения. Излучение реальных тел, идеальные тела. Законы излучения абсолютно черного тела. Законы Ламберта, Кирхгофа, понятие диффузной поверхности излучения и серого тела..

3.2. Теплообмен излучением между твердыми телами, разделенными прозрачной средой  
Теплообмен излучением в замкнутой системе серых тел, разделенных прозрачной средой. Угловые коэффициенты излучения. Теплообмен излучением между двумя безграничными пластинами. Теплообмен излучением между телом и его оболочкой; экранирование излучения. Интегральные уравнения излучения.

3.3. Расчет теплообмена излучением в системе тел, заполненной излучающей и поглощающей средой

Определение поглощательной способности и степени черноты среды (продуктов сгорания). Эффективная длина луча. Закон Бугера. Расчет теплообмена излучением в системе "газ в черной оболочке". Обобщенные угловые коэффициенты излучения. Приближенный расчет лучистого теплообмена в замкнутой системе тел, разделенных излучающей и поглощающей средой (серое приближение). Расчет теплообмена в системе типа «серый газ в серой оболочке», «несерый газ в несерой оболочке». Понятие о методах расчета сложного теплообмена.

#### 4. Конвективный теплообмен

##### 4.1. Введение в конвективный теплообмен

Математическое описание процесса конвективного теплообмена: дифференциальные уравнения энергии, движения, неразрывности. Условия однозначности, уравнение теплоотдачи. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена в приближении пограничного слоя. Безразмерный вид математического описания конвективного теплообмена. Безразмерные комплексы: число Рейнольдса, число Грасгофа, число Релея, число Нуссельта. Физические свойства жидкостей и газов, существенные для процесса конвективного теплообмена. Классификация теплоносителей по числу Прандтля. Экспериментальное изучение процессов конвективного теплообмена. Тепловое моделирование. Элементы теории подобия и размерности. Турбулентность. Уравнения Рейнольдса. Турбулентная теплопроводность. Турбулентная вязкость. Турбулентное число Прандтля.

##### 4.2. Внешняя задача конвективного теплообмена

Теплообмен и сопротивление при ламинарном и турбулентном пограничном слое на пластине. Задачи Блазиуса и Польгаузена. Аналогия Рейнольдса. Теплообмен при вынужденном внешнем поперечном обтекании трубы и пучка труб..

##### 4.3. Конвективная теплоотдача при течении жидкости в трубах и каналах

Теплообмен при движении теплоносителей в трубах и каналах. Первое начало термодинамики для течения в трубах. Местный и средний коэффициенты теплоотдачи. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении в трубе. Вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы. Турбулентное движение в трубах. Формулы Михеева и Петухова. Интеграл Лайона. Теплоотдача при течении жидких металлов. Интенсификация конвективного теплообмена при течении теплоносителя в трубах и каналах.

##### 4.4. Свободная конвекция

Теплоотдача при свободном движении жидкости около тел (пластина, труба), находящихся в неограниченном объеме жидкости. Свободная конвекция в ограниченном объеме (щели, зазоры).

#### 5. Теплообмен при фазовых превращениях

### 5.1. Теплообмен при кипении

Механизм парообразования. Кривая кипения. Пузырьковое и плёночное кипение. Критический радиус пузырька. Скорость роста пузырька. Отрывной диаметр пузырька. Частота отрыва пузырьков. Расчёт коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объёме. Критические тепловые нагрузки при кипении. Теплоотдача при плёночном кипении. Кипение в трубах. Режим течения парожидкостной смеси. Гидродинамика и теплообмен при кипении в трубах. Кризисы теплоотдачи первого и второго рода. Расчёт коэффициентов запаса до кризиса.

### 5.2. Теплообмен при конденсации пара

Виды конденсации. Теплообмен при плёночной конденсации неподвижного пара. Термические сопротивления при конденсации пара. Теплообмен при плёночной конденсации пара, движущегося внутри труб. Теплообмен при плёночной конденсации движущегося пара на горизонтальных одиночных трубах и пучках труб..

## 6. Теплообменные аппараты

### 6.1. Общие сведения о теплообменных аппаратах

Классификация теплообменных аппаратов. Рекуперативные теплообменные аппараты. Регенеративные теплообменные аппараты. Аппараты смешивающего типа..

### 6.2. Расчет теплообменных аппаратов

Уравнения теплового баланса и теплопередачи. Среднеарифметический температурный напор. Прямоток, противоток, сложные схемы движения теплоносителей. Конструкторский и поверочный тепловые расчеты рекуперативного теплообменника. Сравнение прямого и противотока. Гидравлическое сопротивление теплообменных аппаратов. Понятие о расчёте смешительных теплообменников и о расчёте регенеративных теплообменных аппаратов.

## 7. Основные понятия массообмена

### 7.1. Основные понятия массообмена

Концентрационная диффузия (массы). Вектор плотности потока массы. Закон Фика. Коэффициент диффузии. Термо- и бародиффузия. Дифференциальные уравнения совместных процессов массо- и теплообмена. Диффузионный пограничный слой. Аналогия процессов массо- и теплообмена. Диффузионные аналоги чисел Нуссельта и Прандтля.

### 7.2. Массообмен в двухкомпонентных средах

Соотношения материального и энергетического баланса для межфазной границы. Случай полупроницаемой межфазной границы. Формула Стефана. Стефанов поток. Массо- и теплообмен при испарении в парогазовую среду. Адиабатное испарение. Массо- и теплообмен при конденсации пара из парогазовой смеси.

## **3.3. Темы практических занятий**

1. Основные понятия массообмена. Концентрационная диффузия. Закон Фика.;
2. Регулярный режим охлаждения тела;
3. Расчёт температурного поля в телах простой геометрии, перемножение решений, расчет количества теплоты, отданной (полученной) телом за заданный промежуток времени;
4. Законы Фурье, Ньютона, Фика, Ньютона-Рихмана, Стефана-Больцмана;
5. Стационарная теплопередача через многослойную плоскую стенку при постоянном и

- переменном коэффициенте теплопроводности слоёв. Тепловой закон Ома, понятие о термическом сопротивлении теплопроводности, теплоотдачи, теплопередачи;
6. Расчет коэффициента массоотдачи и потока массы компонента на основе аналогии процессов тепло- и массообмена;
  7. Интенсификация теплоотдачи за счёт развития поверхности теплообмена;
  8. Зональный метод расчета излучения в замкнутой системе  $N$  тел;
  9. Метод Фурье расчёта нестационарного температурного поля в безграничной плоской пластине при симметричных граничных условиях третьего типа. Безразмерные обобщённые переменные, безразмерное время - число Фурье, параметр Био;
  10. Температурные поля и тепловые потоки в телах с внутренними источниками теплоты;
  11. Методы подобия и размерностей в задачах теплопроводности и конвективного теплообмена. Числа подобия. Критериальные уравнения;
  12. Получение дискретного аналога стационарного дифференциального уравнения теплопроводности на примере задачи об охлаждении плоской стенки с внутренним источником теплоты;
  13. Решение системы уравнений дискретного аналога для задачи об охлаждении плоской стенки с внутренним источником теплоты методом прогонки. Решение этой же задачи с помощью процедуры `Pdsolve`, сравнение результатов;
  14. Законы теплового излучения абсолютно черного тела. Излучение (и поглощение) серых тел, реальных тел;
  15. Закон Бугера, расчет поглотительной способности и степени черноты серого газа, оптическая толщина слоя, понятие длины пути луча;
  16. Вводное занятие, определения, терминология;
  17. Теплоотдача при смешанном течении плёнки, учёт влияния переменности свойств, влажности, перегрева пара, ориентации поверхности;
  18. Определение степени черноты и поглотительной способности газового объёма с использованием номограмм Хоттеля;
  19. Зональный метод расчета излучения в замкнутой системе тел, разделённых изучающе-поглощающей средой;
  20. Расчет теплоотдачи при кипении жидкости, движущейся в трубах. Кризис кипения второго рода. Граничное паросодержание. Расчет запаса до кризиса кипения;
  21. Конвективная теплоотдача при турбулентном течении жидкости в трубах (каналах);
  22. Система уравнений конвективного теплообмена в приближении пограничного слоя;
  23. Основы расчета теплообменных аппаратов. Уравнения теплового баланса, теплопередачи, среднего температурного напора применительно к рекуперативным теплообменным аппаратам. Методика расчета поверхности теплопередачи;
  24. Расчет лучистого теплообмена в системе тело-оболочка в «сером» и «не сером» приближении;
  25. Конвективная теплоотдача при ламинарном течении жидкости в трубах (каналах). Теплоотдача на начальном участке и участке стабилизированного теплообмена;
  26. Внешняя задача конвективного теплообмена. Вынужденная конвекция;
  27. Проектный расчёт теплообменного аппарата по эффективности и числу единиц переноса теплоты. Основы методики гидравлического расчёта теплообменника;
  28. Стационарная теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку при постоянном и переменном коэффициенте теплопроводности слоёв. Линейная плотность теплового потока, линейный коэффициент теплопередачи. Критический диаметр тепловой изоляции, выбор изоляции по критическому диаметру;
  29. Особенности конвективной теплоотдачи при течении жидких металлов, сжимаемого газа;
  30. Теплоотдача при плёночной конденсации пара на вертикальной поверхности (трубе). Ламинарное течение пленки конденсата, формула Нуссельта. Ламинарно-

волновое течение, поправка Капицы. Безразмерные уравнения для расчёта КТО;  
31. Расчет теплообмена излучением в замкнутой системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой. Угловые коэффициенты излучения, их свойства и вычисление;  
32. Расчет теплоотдачи при развитом пузырьковом и пленочном кипении в большом объеме. Кризис кипения первого рода;  
33. Внешняя задача конвективного теплообмена. Свободная конвекция;  
34. Расчёт температурного поля в длинном цилиндре конечного радиуса при симметричных граничных условиях третьего типа.

### **3.4. Темы лабораторных работ**

1. Лабораторная работа № 2 «Методы нестационарной теплопроводности» (4 часа);
2. Лабораторная работа № 1 «Методы стационарной теплопроводности» (4 часа);
3. Лабораторная работа № 3 «Определение степени черноты тела калориметрическим методом» (4 часа);
4. Лабораторная работа № 4 «Определение средних угловых коэффициентов излучения» (4 часа);
5. Лабораторная работа № 5 «Испытание рекуперативного теплообменника» – 1 работа (4 часа);
6. Лабораторная работа № 6 «Теплоотдача при свободной и вынужденной конвекции жидкости» (4 часа);
7. Лабораторная работа № 7 «Теплоотдача при течении жидкости в трубах (каналах)» (4 часа);
8. Лабораторная работа № 8» Теплоотдача при кипении жидкостей в большом объеме». (4 часа).

### **3.5 Консультации**

#### *Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)*

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Введение в тепломассообмен. Способы переноса теплоты. Основные определения, терминология"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Теплопроводность"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Теплообмен излучением"
4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Конвективный теплообмен"
5. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Теплоотдача при фазовых превращениях"
6. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Теплообменные аппараты"
7. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Основные понятия массообмена"

### **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	6	7		
<b>Знать:</b>										
основные положения теории теплопроводности, теплопроводность при стационарном и нестационарном режиме	ИД-3ОПК-4		+							Контрольная работа/Типовые задачи теплопроводности
основные законы массо- и теплообмена в двухфазных средах	ИД-3ОПК-4							+		Контрольная работа/Теплообменники. Массообмен
основные законы теплового излучения, теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой, теплообмен излучением в поглощающих и излучающих средах	ИД-3ОПК-4			+						Контрольная работа/Излучение
основные положения и уравнения теплового расчета тепломассообменных аппаратов	ИД-3ОПК-4							+		Контрольная работа/Теплообменники. Массообмен
перенос теплоты в жидких и газообразных телах, законы сохранения и превращения энергии, законы и основные физико-математические модели процессов переноса теплоты и массы применительно к процессам передачи и трансформации теплоты	ИД-3ОПК-4				+					Контрольная работа/Конвективный теплообмен Тестирование/Основные понятия конвективного теплообмена
терминологию тепломассообмена, физический смысл и размерности основных величин, используемых в тепломассообмене	ИД-3ОПК-4	+								Тестирование/Введение в тепломассообмен
закономерности теплообмена при фазовых превращениях	ИД-3ОПК-4					+				Контрольная работа/Теплообмен при фазовых переходах
<b>Уметь:</b>										
рассчитывать температурные поля и тепловые потоки в элементах конструкции тепловых и теплотехнологических установок с использованием справочной литературы по теплофизическим свойствам	ИД-3ОПК-4		+							Расчетно-графическая работа/Расчетное задание по теплопроводности

твердых тел, жидкостей и газов									
выполнять теплогидравлический расчёт теплообменных аппаратов	ИД-3ОПК-4							+	Расчетно-графическая работа/Теплогидравлический расчет теплообменного аппарата
проводить теплотехнические эксперименты с целью изучения калорических и переносных свойства рабочих веществ	ИД-3ОПК-4		+	+					Лабораторная работа/Защита лабораторных работ № 1,2,3,36,18,19
проводить теплотехнические эксперименты с целью изучения процессов переноса теплоты в энергетических и теплотехнологических установках	ИД-3ОПК-4				+	+	+		Лабораторная работа/Защита лабораторных работ № 7,9,10,13,17,32,37,26
рассчитывать теплообмен излучением в системе тел, заполненных излучающей и поглощающей средой	ИД-3ОПК-4			+					Контрольная работа/Излучение

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

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

#### **4 семестр**

Форма реализации: Защита задания

1. Защита лабораторных работ № 1,2,3,36,18,19 (Лабораторная работа)
2. Расчетное задание по теплопроводности (Расчетно-графическая работа)

Форма реализации: Письменная работа

1. Введение в теплообмен (Тестирование)
2. Излучение (Контрольная работа)
3. Типовые задачи теплопроводности (Контрольная работа)

#### **5 семестр**

Форма реализации: Защита задания

1. Теплогидравлический расчет теплообменного аппарата (Расчетно-графическая работа)

Форма реализации: Письменная работа

1. Конвективный теплообмен (Контрольная работа)
2. Основные понятия конвективного теплообмена (Тестирование)
3. Теплообмен при фазовых переходах (Контрольная работа)
4. Теплообменники. Массообмен (Контрольная работа)

Форма реализации: Устная форма

1. Защита лабораторных работ № 7,9,10,13,17,32,37,26 (Лабораторная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

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

#### Экзамен (Семестр №4)

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

#### Экзамен (Семестр №5)

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 5 семестр.

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

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

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

1. Цветков, Ф. Ф. Теплообмен : Учебное пособие для вузов по энергетическим специальностям / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев . – М. : Изд-во МЭИ, 2001 . – 550 с. - ISBN 5-7046-0569-9 .;

2. Исаченко, В. П. Теплопередача : Учебник для энергетических вузов и факультетов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел . – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981 . – 416 с.;
3. Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену : учебное пособие для вузов по направлению 140100 "Теплоэнергетика" / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко . – 3-е изд., стер . – М. : Издательский дом МЭИ, 2010 . – 196 с. - ISBN 978-5-383-00468-5 .;
4. Практикум по теплопередаче : учебное пособие для теплоэнергетических специальностей вузов / Ред. А. П. Солодов . – М. : Энергоатомиздат, 1986 . – 296 с.;
5. Александров, А. А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики : справочник / А. А. Александров, К. А. Орлов, В. Ф. Очков . – М. : Издательский дом МЭИ, 2009 . – 224 с. - ISBN 978-5-383-00405-0 .;
6. Солодов, А. П. Тепломассообмен в энергетических установках. Инженерные методы расчета. Электронный курс : учебное пособие по курсам "Тепломассообмен", "Тепломассообмен в оборудовании АЭС" по направлениям "Ядерная энергетика и теплофизика", "Теплоэнергетика и теплотехника" / А. П. Солодов, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – М. : Изд-во МЭИ, 2015 . – 124 с. - ISBN 978-5-7046-1636-8 .  
<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=6989>;
7. Григорьев Б.А.- "Тепломассообмен", Издательство: "МЭИ", Москва, 2011 - (562 с.)  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383005637.html>.

## 5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. СДО "Прометей";
2. Office / Российский пакет офисных программ;
3. Windows / Операционная система семейства Linux;
4. SmathStudio.

## 5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - [http://biblioclub.ru/index.php?page=main\\_ub\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red)
3. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
4. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
5. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
6. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
7. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
8. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории	В-209/10, Учебная	рабочее место сотрудника, стул,

для проведения лабораторных занятий	лаборатория теплообмена	компьютерная сеть с выходом в Интернет, лабораторный стенд, компьютер персональный, принтер, инвентарь учебный, стенд информационный
	В-205, Учебная лаборатория технической термодинамики	рабочее место сотрудника, стол преподавателя, стол, шкаф для документов, шкаф для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный, инвентарь специализированный, стенд лабораторный, учебно-наглядное пособие
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Помещения для самостоятельной работы	Т-512, Компьютерный класс	стол, стул, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная, компьютер персональный
Помещения для консультирования	В-209/1, Помещение учебно-вспомогательного персонала каф. "ТОТ"	рабочее место сотрудника, стол, стул, шкаф для документов, шкаф для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, многофункциональный центр, компьютер персональный, принтер
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	В-417, Помещение учебно-вспомогательного персонала каф. "ТОТ"	кресло рабочее, рабочее место сотрудника, стол, стул, шкаф для документов, шкаф для хранения инвентаря, компьютерная сеть с выходом в Интернет, доска маркерная, многофункциональный центр, компьютер персональный, принтер, кондиционер

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

## Тепломассообмен

(название дисциплины)

## 4 семестр

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

- КМ-1 Введение в тепломассообмен (Тестирование)  
 КМ-2 Типовые задачи теплопроводности (Контрольная работа)  
 КМ-3 Излучение (Контрольная работа)  
 КМ-4 Расчетное задание по теплопроводности (Расчетно-графическая работа)  
 КМ-5 Защита лабораторных работ № 1,2,3,36,18,19 (Лабораторная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
		Неделя КМ:	3	7	11	15	16
1	Введение в тепломассообмен						
1.1	Способы переноса теплоты		+				
1.2	Основные определения, терминология		+				
2	Теплопроводность						
2.1	Математическое описание процесса теплопроводности			+			
2.2	Стационарная теплопроводность			+		+	+
2.3	Нестационарная теплопроводность			+		+	+
3	Теплообмен излучением						
3.1	Основные понятия и законы теплового излучения				+		
3.2	Теплообмен излучением между твердыми телами, разделенными прозрачной средой				+		+
3.3	Расчет теплообмена излучением в системе тел, заполненной излучающей и поглощающей средой				+		
Вес КМ, %:			10	20	20	25	25

## 5 семестр

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

- КМ-6 Основные понятия конвективного теплообмена (Тестирование)  
 КМ-7 Конвективный теплообмен (Контрольная работа)  
 КМ-8 Теплообмен при фазовых переходах (Контрольная работа)

- КМ-9 Теплообменники. Массообмен (Контрольная работа)  
 КМ-10 Теплогидравлический расчет теплообменного аппарата (Расчетно-графическая работа)  
 КМ-11 Защита лабораторных работ № 7,9,10,13,17,32,37,26 (Лабораторная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-6	КМ-7	КМ-8	КМ-9	КМ-10	КМ-11
		Неделя КМ:	3	7	11	14	15	16
1	Конвективный теплообмен							
1.1	Введение в конвективный теплообмен		+	+				
1.2	Внешняя задача конвективного теплообмена							+
1.3	Конвективная теплоотдача при течении жидкости в трубах и каналах							+
1.4	Свободная конвекция							+
2	Теплообмен при фазовых превращениях							
2.1	Теплообмен при кипении				+			+
2.2	Теплообмен при конденсации пара				+			
3	Теплообменные аппараты							
3.1	Общие сведения о теплообменных аппаратах					+		
3.2	Расчет теплообменных аппаратов					+	+	+
4	Основные понятия массообмена							
4.1	Основные понятия массообмена					+		
4.2	Массообмен в двухкомпонентных средах					+		
Вес КМ, %:			10	20	20	20	10	20