

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

---

Направление подготовки/специальность: 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Теплофизика

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная


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

<b>Блок:</b>	<b>Блок 1 «Дисциплины (модули)»</b>
<b>Часть образовательной программы:</b>	<b>Часть, формируемая участниками образовательных отношений</b>
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	<b>Б1.Ч.08</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>7 семестр - 6; 8 семестр - 4; всего - 10</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>360 часов</b>
<b>Лекции</b>	<b>7 семестр - 64 часа; 8 семестр - 42 часа; всего - 106 часов</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>7 семестр - 32 часа; 8 семестр - 28 часа; всего - 60 часов</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>7 семестр - 2 часа; 8 семестр - 2 часа; всего - 4 часа</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>7 семестр - 117,5 часов; 8 семестр - 71,5 часа; всего - 189,0 часа</b>
<b>в том числе на КП/КР</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Иная контактная работа</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>включая:</b> <b>Проверочная работа</b> <b>Контрольная работа</b> <b>Коллоквиум</b> <b>Расчетно-графическая работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Экзамен</b>	<b>7 семестр - 0,5 часа;</b>
<b>Экзамен</b>	<b>8 семестр - 0,5 часа;</b>
	<b>всего - 1,0 час</b>

**Москва 2023**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**


Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Ягов В.В.
	Идентификатор	R6b311ccd-YagovVV-d634fce7

В.В. Ягов


**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Яньков Г.Г.
	Идентификатор	Rbb1f0c84-YankovGG-11a2e4dc

Г.Г. Яньков

Заведующий выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Герасимов Д.Н.
	Идентификатор	Ra5495398-GerasimovDN-6b58615

Д.Н. Герасимов

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** изучение механизмов основных видов однофазного конвективного теплообмена, теплообмена при фазовых превращениях и практическое освоение современных методов расчета этих процессов

### Задачи дисциплины

- освоение содержания законов сохранения массы, импульса, энергии и массы компонента в смеси и понимание роли этих общих законов в решении задач теплообмена;
- овладение методами составления математического описания процессов теплообмена применительно к типовым конструкциям и режимам работы теплообменного оборудования;
- изучение содержания и методов теории подобия применительно к изучению процессов теплообмена;
- формирование понимания физических механизмов переноса тепла в различных задачах однофазного конвективного теплообмена;
- овладение методами расчета практических задач теплообмена при вынужденной и естественной конвекции;
- изучение основных закономерностей течения и теплообмена в двухфазных парожидкостных системах;
- овладение методами расчета интенсивности теплообмена при конденсации и при различных режимах кипения.

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 проводить расчеты теплофизических характеристик процессов, протекающих в конкретных технических устройствах и аппаратах энергетического оборудования	ИД-1 <sub>ПК-1</sub> Владеет навыками расчета процессов гидродинамики и теплообмена в энергетическом оборудовании	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- закономерности процессов вынужденной однофазной конвекции при изменяющихся теплофизических свойствах жидкости;</li><li>- математическое описание и модели двухфазных сред;</li><li>- закономерности процессов свободной и вынужденной однофазной конвекции;</li><li>- закономерности теплообмена при конденсации и кипении;</li><li>- методы теории подобия для обобщения результатов опытного исследования теплообмена;</li><li>- математическое описание процессов тепло- и массообмена.</li></ul> <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- проводить тепловой расчет теплообменных аппаратов;</li><li>- выбирать методику и осуществлять расчет температурного режима тепловыделяющих объектов;</li><li>- рассчитывать допустимые уровни тепловых потоков при кипении жидкости;</li><li>- рассчитывать интенсивность</li></ul>

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
		теплообмена при конденсации; - работать с данными о теплофизических свойствах веществ, необходимых в расчетах теплообмена.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Теплофизика (далее – ОПОП), направления подготовки 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать основы дифференциального и интегрального исчисления
- знать основы теории обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений с частными производными
- знать основы теории механики вязкой жидкости
- знать основные законы термодинамики
- знать основы теории термодинамических свойств веществ
- уметь вычислять интегралы
- уметь решать дифференциальные уравнения
- уметь решать задачи по термодинамике

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	Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений	22	7	8	-	4	-	-	-	-	-	10	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[1], стр. 19-55 [2], стр. 19-55</p>
1.1	Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений	22		8	-	4	-	-	-	-	-	10	-	
2	Математическое описание процессов конвективного теплообмена	22		8	-	4	-	-	-	-	-	10	-	
2.1	Математическое описание процессов конвективного теплообмена	22		8	-	4	-	-	-	-	-	10	-	
3	Применение теории	18		6	-	4	-	-	-	-	-	8	-	

	подобия к анализу теплообмена															<b><u>теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Применение теории подобия к анализу теплообмена"
3.1	Применение теории подобия к анализу теплообмена	18	6	-	4	-	-	-	-	-	-	8	-			<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 91-119 [2], стр. 91-119
4	Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой. Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения	22	8	-	4	-	-	-	-	-	-	10	-			<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой. Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения"
4.1	Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой	11	4	-	2	-	-	-	-	-	-	5	-			<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 121-149 [2], стр. 121-149
4.2	Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения	11	4	-	2	-	-	-	-	-	-	5	-			
5	Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи. Теплообмен при обтекании пучков труб	24	8	-	4	-	-	-	-	-	-	12	-			<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи. Теплообмен при обтекании пучков труб"
5.1	Механизм	14	6	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-			<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 151-192 [2], стр. 151-192

	турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи												
5.2	Теплообмен при обтекании пучков труб	10	2	-	2	-	-	-	-	-	6	-	
6	Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах	22	8	-	4	-	-	-	-	-	10	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 195-223 [2], стр. 195-223
6.1	Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах	22	8	-	4	-	-	-	-	-	10	-	
7	Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении	26	10	-	4	-	-	-	-	-	12	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 225-257 [2], стр. 225-257
7.1	Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении	26	10	-	4	-	-	-	-	-	12	-	
8	Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном	24	8	-	4	-	-	-	-	-	12	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу

	участке круглой трубы. Начальный участок при турбулентном течении.												"Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном участке круглой трубы. Начальный участок при турбулентном течении." <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 258-282 [2], стр. 258-282
8.1	Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном участке круглой трубы. Начальный участок при турбулентном течении	24		8	-	4	-	-	-	-	-	12	-
	Экзамен	36.0		-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5
	<b>Всего за семестр</b>	<b>216.0</b>		<b>64</b>	-	<b>32</b>	-	<b>2</b>	-	-	<b>0.5</b>	<b>84</b>	<b>33.5</b>
	<b>Итого за семестр</b>	<b>216.0</b>		<b>64</b>	-	<b>32</b>	<b>2</b>		-		<b>0.5</b>	<b>117.5</b>	
9	Влияние переменности свойств теплоносителя. Влияние свободной конвекции. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена	18	8	6	-	6	-	-	-	-	-	6	-
9.1	Влияние переменности свойств теплоносителя. Влияние свободной конвекции	6		2	-	2	-	-	-	-	-	2	-
9.2	Теплообмен при СКД	6		2	-	2	-	-	-	-	-	2	-
9.3	Интенсификация конвективного теплообмена	6		2	-	2	-	-	-	-	-	2	-
10	Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные	18		8	-	4	-	-	-	-	-	6	-
													<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные характеристики



	характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель												двухфазных потоков. Гомогенная модель" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b>
10.1	Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель	18	8	-	4	-	-	-	-	-	6	-	[1], стр. 319-370 [2], стр. 319-370
11	Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации	26	10	-	6	-	-	-	-	-	10	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b>
11.1	Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации	26	10	-	6	-	-	-	-	-	10	-	[1], стр. 372-418 [2], стр. 372-418
12	Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия отрыва от стенки	20	8	-	4	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия отрыва от стенки"
12.1	Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия	20	8	-	4	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 419-468

	отрыва от стенки												[2], стр. 419-468
13	Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения	26	10	-	8	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b>
13.1	Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения	26	10	-	8	-	-	-	-	-	8	-	[1], стр. 468-536 [2], стр. 468-532
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>144.0</b>	<b>42</b>	<b>-</b>	<b>28</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>38</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>144.0</b>	<b>42</b>	<b>-</b>	<b>28</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>71.5</b>		
	<b>ИТОГО</b>	<b>360.0</b>	<b>-</b>	<b>106</b>	<b>-</b>	<b>60</b>	<b>4</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1.0</b>	<b>189.0</b>		

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

### **3.2 Краткое содержание разделов**

#### 1. Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений

1.1. Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений

Содержание и классификация задач конвективного теплообмена. Связь молекулярного и конвективного переноса тепла в движущейся жидкости. Коэффициент теплоотдачи, число Нуссельта. Качественные закономерности и расчетные формулы для теплообмена при обтекании плоской пластины и для течения в круглых трубах.

#### 2. Математическое описание процессов конвективного теплообмена

2.1. Математическое описание процессов конвективного теплообмена

Общая форма уравнений сохранения при эйлеровом методе описания. Уравнение сохранения массы (неразрывности). Уравнение сохранения импульса; тензоры плотности потока импульса, давлений и вязких напряжений; различные формы дифференциального уравнения сохранения импульса. Уравнение сохранения энергии в движущейся среде; плотность потока полной энергии; различные формы дифференциального уравнения энергии. Уравнение сохранения массы компонента в бинарной смеси; влияние диффузионного потока массы компонента на перенос импульса и энергии в бинарной смеси. Аналогия процессов переноса импульса, энергии и массы компонента в смеси.

#### 3. Применение теории подобия к анализу теплообмена

3.1. Применение теории подобия к анализу теплообмена

Подобие физических явлений. Теоремы теории подобия. Подобие и аналогия. Теория подобия как научная основа экспериментальных исследований. Теория подобия и моделирование. Физический смысл чисел подобия в механике однофазных и двухфазных систем, в процессах конвективного тепло- и массообмена. Теория размерностей.

#### 4. Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой. Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения

4.1. Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой

Система уравнений температурного пограничного слоя. Анализ теплообмена при ламинарном течении в погранслое методами размерностей. Теплообмен при ламинарном обтекании изотермической пластины; анализ предельных по числу Прандтля случаев.

4.2. Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения

Переход к турбулентному режиму течения в пограничном слое и в каналах: основные результаты теоретического анализа устойчивости, факторы, влияющие на переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения движения и энергии для турбулентного течения; кажущиеся напряжения турбулентного трения, турбулентный тепловой поток. Структура пристенной турбулентной области.

#### 5. Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи. Теплообмен при обтекании пучков труб

5.1. Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи

Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса для теплообмена при турбулентном течении в пограничном слое. Ее модернизированный вариант (двухслойная схема), расчетные соотношения для теплоотдачи.

5.2. Теплообмен при обтекании пучков труб

Теплообмен при поперечном обтекании одиночного цилиндра и пучков труб.

### 6. Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах

6.1. Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах

Механизм и математическое описание свободной конвекции, приближение Буссинеска, максимальная скорость свободной конвекции. Свободноконвективный пограничный слой на вертикальной плоскости, расчет коэффициента теплоотдачи при ламинарном и турбулентном течении. Свободная конвекция у поверхности горизонтального цилиндра и сферы. Свободная конвекция на горизонтальной плоскости, в прослойках и в замкнутых объемах.

### 7. Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении

7.1. Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона.

Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении

Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Тепловой баланс, среднемассовая скорость и температура. Стабилизированный теплообмен при граничных условиях 2-го рода, профили скорости, температуры, теплового потока при ламинарном и турбулентном течении; интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном течении. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении: результаты теоретического анализа для неметаллических жидкостей и жидких металлов, расчетные формулы..

### 8. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном участке круглой трубы. Начальный участок при турбулентном течении.

8.1. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном участке круглой трубы.

Начальный участок при турбулентном течении

Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном термическом участке круглой трубы. Начальный гидродинамический участок. Начальный участок при турбулентном течении.

### 9. Влияние переменности свойств теплоносителя. Влияние свободной конвекции. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена

9.1. Влияние переменности свойств теплоносителя. Влияние свободной конвекции

Влияние переменности свойств жидкости на теплообмен при течении в трубах капельных жидкостей и газов. Влияние свободной конвекции на теплообмен при вынужденном течении жидкостей в трубах различной ориентации.

9.2. Теплообмен при СКД

Теплообмен в однофазной сверхкритической области..

### 9.3. Интенсификация конвективного теплообмена

Методы интенсификации процессов однофазного конвективного теплообмена.

#### 10. Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель

10.1. Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель

Математическое описание и модели двухфазных сред. Универсальные условия совместности на межфазных границах: вывод в общей форме, запись для потоков массы, импульса, энергии и массы компонента в смеси. Скорость границы раздела фаз. Универсальные условия совместности в системе отсчета наблюдателя. Специальные условия совместности для процессов теплообмена. Неравновесность на межфазных границах; квазиравновесное приближение. Количественные характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель.

#### 11. Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации

11.1. Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации

Пленочная и капельная конденсация. Теплообмен при пленочной конденсации на вертикальной плоскости (задача Нуссельта). Конденсация на поверхности горизонтального цилиндра. Анализ основных допущений в задаче Нуссельта, расчетные формулы. Теплообмен при конденсации в условиях турбулентного течения пленки. Конденсация движущегося пара. Теплообмен при конденсации в трубах при турбулентном течении двухфазной смеси. Конденсация на пучках труб и методы ее интенсификации.

#### 12. Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия отрыва от стенки

12.1. Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия отрыва от стенки

Условия зарождения парового зародыша в объеме перегретой жидкости и на твердой поверхности нагрева. Рост паровых пузырьков в объеме однородно перегретой жидкости: анализ «предельных» схем роста, решения для динамической инерционной и тепловой энергетической схем роста, особенности роста при больших числах Якоба. Основные закономерности роста и отрыва паровых пузырьков на твердой поверхности.

#### 13. Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения

13.1. Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения

“Кривая кипения”. Теплообмен при пленочном и переходном кипении. Теплообмен при пузырьковом кипении в большом объеме (механизм процесса, обоснование расчетного уравнения). Кризисы кипения в большом объеме. Характер изменения среднemasсовой температуры жидкости, температуры стенки, расходного массового паросодержания по длине обогреваемого канала. Теплообмен при кипении жидкости в условиях ее вынужденного движения. Кризис теплоотдачи при кипении в трубах.

### 3.3. Темы практических занятий

1. Теплообмен при кипении;
2. Теплообмен при свободной конвекции;
3. Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины;
4. Составление математического описания процессов тепло- и массообмена;
5. Теплообмен при конденсации пара;
6. Влияние свободной конвекции на теплообмен при вынужденном течении в трубах;
7. Тепловой расчет теплообменных аппаратов;
8. Применение теории подобия к решению задач гидродинамики и теплообмена;
9. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при течении в трубах жидкости и газа с переменными физическими свойствами;
10. Теплообмен и сопротивление трения при течении в шероховатых трубах;
11. Расчет теплообмена при СКД;
12. Теплообмен при течении в трубах;
13. Введение в механику двухфазных систем;
14. Расчет среднemasсовой температуры и теплоотдачи при течении жидкости в трубах;
15. Теплообмен при поперечном обтекании труб и трубных пучков.

### 3.4. Темы лабораторных работ

не предусмотрено

### 3.5 Консультации

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

1. Обсуждение материалов раздела "Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений"
2. Обсуждение материалов раздела "Математическое описание процессов конвективного тепломассообмена"
3. Обсуждение материалов раздела "Применение теории подобия к анализу тепломассообмена"
4. Обсуждение материалов раздела "Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой. Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения"
5. Обсуждение материалов раздела "Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи. Теплообмен при обтекании пучков труб"
6. Обсуждение материалов раздела "Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах"
7. Обсуждение материалов раздела "Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении"
8. Обсуждение материалов раздела "Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном участке круглой трубы. Начальный участок при турбулентном течении."
9. Обсуждение материалов раздела "Влияние переменности свойств теплоносителя. Влияние свободной конвекции. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена"
10. Обсуждение материалов раздела "Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель"

11. Обсуждение материалов раздела "Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации"
12. Обсуждение материалов раздела "Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия отрыва от стенки"
13. Обсуждение материалов раздела "Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения"

### **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	8	9	10	11	12	13	
<b>Знать:</b>															
математическое описание процессов тепло- и массообмена	ИД-1ПК-1		+	+											Коллоквиум/Коэффициент теплоотдачи; математическое описание ТМО; методы подобия
методы теории подобия для обобщения результатов опытного исследования теплообмена	ИД-1ПК-1			+		+	+								Проверочная работа/Числа подобия
закономерности теплообмена при конденсации и кипении	ИД-1ПК-1											+	+	+	Коллоквиум/Теплообмен при конденсации Коллоквиум/Физические закономерности кипения и расчет теплообмена
закономерности процессов свободной и вынужденной однофазной конвекции	ИД-1ПК-1				+	+	+	+	+						Коллоквиум/Теплообмен в каналах Коллоквиум/Теплообмен в пограничном слое; свободная конвекция
математическое описание и модели двухфазных сред	ИД-1ПК-1										+				Коллоквиум/Модели и математическое описание двухфазных систем
закономерности процессов вынужденной однофазной конвекции при изменяющихся теплофизических свойствах жидкости	ИД-1ПК-1									+					Коллоквиум/Влияние переменности свойств теплоносителя и свободной конвекции на теплообмен. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена
<b>Уметь:</b>															
работать с данными о теплофизических свойствах	ИД-1ПК-1									+					Проверочная работа/Расчет теплоотдачи при СКД



веществ, необходимых в расчетах теплообмена															
рассчитывать интенсивность теплообмена при конденсации	ИД-1ПК-1												+		Контрольная работа/Теплообмен при конденсации пара
рассчитывать допустимые уровни тепловых потоков при кипении жидкости	ИД-1ПК-1													+	Контрольная работа/Теплообмен при кипении
выбирать методику и осуществлять расчет температурного режима тепловыделяющих объектов	ИД-1ПК-1	+	+		+	+	+	+							<p>Расчетно-графическая работа/Составление математического описания и решение задачи о теплообмене для простых геометрических условий (пластина, плоский канал)</p> <p>Проверочная работа/Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины</p> <p>Контрольная работа/Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины. Расчет среднemasсовой температуры и теплоотдачи при течении жидкости в трубах</p> <p>Контрольная работа/Теплообмен при свободной конвекции</p> <p>Контрольная работа/Теплообмен при течении в трубах. Теплообмен при поперечном обтекании труб и трубных пучков</p>
проводить тепловой расчет теплообменных аппаратов	ИД-1ПК-1												+		Контрольная работа/Тепловой расчет теплообменных аппаратов

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

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

###### **7 семестр**

Форма реализации: Выполнение задания

1. Составление математического описания и решение задачи о теплообмене для простых геометрических условий (пластина, плоский канал) (Расчетно-графическая работа)

Форма реализации: Письменная работа

1. Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины (Проверочная работа)
2. Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины. Расчет среднemasсовой температуры и теплоотдачи при течении жидкости в трубах (Контрольная работа)
3. Теплообмен при свободной конвекции (Контрольная работа)
4. Теплообмен при течении в трубах. Теплообмен при поперечном обтекании труб и трубных пучков (Контрольная работа)
5. Числа подобия (Проверочная работа)

Форма реализации: Смешанная форма

1. Коэффициент теплоотдачи; математическое описание ТМО; методы подобия (Коллоквиум)
2. Теплообмен в каналах (Коллоквиум)
3. Теплообмен в погранслое; свободная конвекция (Коллоквиум)

###### **8 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Расчет теплоотдачи при СКД (Проверочная работа)
2. Тепловой расчет теплообменных аппаратов (Контрольная работа)
3. Теплообмен при кипении (Контрольная работа)
4. Теплообмен при конденсации пара (Контрольная работа)

Форма реализации: Смешанная форма

1. Влияние переменности свойств теплоносителя и свободной конвекции на теплообмен. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена (Коллоквиум)
2. Модели и математическое описание двухфазных систем (Коллоквиум)
3. Теплообмен при конденсации (Коллоквиум)
4. Физические закономерности кипения и расчет теплообмена (Коллоквиум)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

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

Экзамен (Семестр №7)

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

Экзамен (Семестр №8)

Итоговая 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 8 семестр.

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

## 5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1 Печатные и электронные издания:

1. Ягов В.В.- "Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях", Издательство: "МЭИ", Москва, 2019  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383012451.html>;
2. Ягов, В. В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях : учебное пособие для вузов по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / В. В. Ягов . – М. : Издательский дом МЭИ, 2014 . – 542 с. - ISBN 978-5-383-00854-6 ..

### 5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. Office / Российский пакет офисных программ;
2. Windows / Операционная система семейства Linux.

### 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. База данных журналов издательства Elsevier - <https://www.sciencedirect.com/>
4. Электронные ресурсы издательства Springer - <https://link.springer.com/>
5. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
6. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
7. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>

## 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
	Т-408, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Т-408, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Т-408, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Помещения для	Т-412, Учебная	стол преподавателя, стол учебный, стул,

самостоятельной работы	лаборатория вычислительной техники	компьютерная сеть с выходом в Интернет, доска маркерная, компьютер персональный
Помещения для консультирования	Т-205, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, доска маркерная
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	Т-213, Подсобное помещение	

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Тепломассообмен

(название дисциплины)

#### 7 семестр

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

- КМ-1 Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины (Проверочная работа)
- КМ-2 Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины. Расчет среднemasсовой температуры и теплоотдачи при течении жидкости в трубах (Контрольная работа)
- КМ-3 Числа подобия (Проверочная работа)
- КМ-4 Коэффициент теплоотдачи; математическое описание ТМО; методы подобия (Коллоквиум)
- КМ-5 Теплообмен при течении в трубах. Теплообмен при поперечном обтекании труб и трубных пучков (Контрольная работа)
- КМ-6 Составление математического описания и решение задачи о теплообмене для простых геометрических условий (пластина, плоский канал) (Расчетно-графическая работа)
- КМ-7 Теплообмен в погранслое; свободная конвекция (Коллоквиум)
- КМ-8 Теплообмен при свободной конвекции (Контрольная работа)
- КМ-9 Теплообмен в каналах (Коллоквиум)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6	КМ-7	КМ-8	КМ-9
		Неделя КМ:	3	6	8	9	13	15	15	16	16
1	Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений										
1.1	Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений		+	+			+	+		+	
2	Математическое описание процессов конвективного теплообмена										

2.1	Математическое описание процессов конвективного теплообмена	+	+		+	+	+		+	
3	Применение теории подобия к анализу теплообмена									
3.1	Применение теории подобия к анализу теплообмена			+	+					
4	Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой. Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения									
4.1	Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой	+	+			+	+	+	+	+
4.2	Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения	+	+			+	+	+	+	+
5	Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи. Теплообмен при обтекании пучков труб									
5.1	Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи	+	+	+		+	+	+	+	+
5.2	Теплообмен при обтекании пучков труб	+	+	+		+	+	+	+	+
6	Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах									
6.1	Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах	+	+	+		+	+	+	+	+

7	Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении									
7.1	Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении	+	+			+	+	+	+	+
8	Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном участке круглой трубы. Начальный участок при турбулентном течении.									
8.1	Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном участке круглой трубы. Начальный участок при турбулентном течении							+		+
Вес КМ, %:		4	14	4	14	14	8	14	14	14

### 8 семестр

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

- КМ-10 Влияние переменности свойств теплоносителя и свободной конвекции на теплообмен. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена (Коллоквиум)
- КМ-11 Тепловой расчет теплообменных аппаратов (Контрольная работа)
- КМ-12 Модели и математическое описание двухфазных систем (Коллоквиум)
- КМ-13 Теплообмен при конденсации пара (Контрольная работа)
- КМ-14 Расчет теплоотдачи при СКД (Проверочная работа)
- КМ-15 Теплообмен при конденсации (Коллоквиум)
- КМ-16 Теплообмен при кипении (Контрольная работа)
- КМ-17 Физические закономерности кипения и расчет теплообмена (Коллоквиум)

Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-10	КМ-11	КМ-12	КМ-13	КМ-14	КМ-15	КМ-16	КМ-17
		Неделя КМ:	3	4	8	9	10	11	12	13
1	Влияние переменности свойств теплоносителя. Влияние свободной конвекции. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена									
1.1	Влияние переменности свойств теплоносителя. Влияние свободной конвекции		+				+			
1.2	Теплообмен при СКД		+				+			
1.3	Интенсификация конвективного теплообмена			+						
2	Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель									
2.1	Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель				+					
3	Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации									
3.1	Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации					+		+		+
4	Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия отрыва от стенки									
4.1	Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия отрыва от стенки							+		+
5	Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом									



	кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения								
5.1	Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения						+	+	+
Вес КМ, %:		7	15	8	15	10	15	15	15