
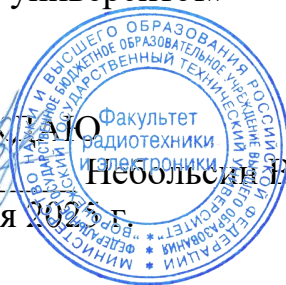


**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДЕНО  
Декан факультета  Небольсин В.А.  
«17» января 2025 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

дисциплины

«Тепломассообмен»

**Направление подготовки** 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика


**Профиль** Технологические системы жизнеобеспечения АЭС и  
промышленных предприятий

**Квалификация выпускника** бакалавр

**Нормативный период обучения** 4 года

**Форма обучения** очная

**Год начала подготовки** 2025

Автор программы  / О.В. Калядин /

Заведующий кафедрой  
Твердотельной электроники  / В.А. Небольсин /

Руководитель ОПОП  /О.В. Калядин/

Воронеж 2025

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.1. Цели дисциплины

Целью дисциплины служит подготовка студентов к усвоению вопросов тепломассообмена в спецкурсах и к использованию полученных знаний и навыков в профессиональной деятельности и на стадии дипломного проектирования.

### 1.2. Задачи освоения дисциплины

Задачами изучения дисциплины являются:

- изучение закономерностей основных процессов переноса теплоты и массы,
- усвоение основных результатов теоретических и экспериментальных исследований и ознакомление с путями решения современных проблем тепломассообмена,
- приобретение умений и навыков в проведении тепловых расчетов и решении практических задач, связанных с тепломассообменом в элементах энергетических установок.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Тепломассообмен» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений блока Б1.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Тепломассообмен» направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-1 - Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ОПК-1	Знать способы расчета количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик
	Уметь выполнять расчеты количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик
	Владеть навыками расчета количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик

## 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Тепломассообмен» составляет 8 з.е.  
 Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий  
**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры	
		3	4
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	162	72	90
В том числе:			
Лекции	72	36	36
Практические занятия (ПЗ)	72	36	36
Лабораторные работы (ЛР)	18	-	18
<b>Самостоятельная работа</b>	90	54	36
<b>Курсовая работа</b>	+		+
Часы на контроль	36	-	36
Виды промежуточной аттестации - экзамен, зачет	+	+	+
Общая трудоемкость:			
академические часы	288	126	162
зач.ед.	8	3.5	4.5

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

#### очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Основные положения учения о теплопередаче	Понятие теплопередачи. Способы передачи теплоты. Виды сред. Температурное поле. Температурный градиент. Тепловой поток. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Механизм теплопроводности в газах, жидкостях и твердых телах. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Вывод. Общий вид уравнения. Вид уравнения при отсутствии внутренних источников теплоты, для стационарного температурного поля. Условия однозначности для процессов теплопроводности	6	6		18	30
2	Теплопроводность	Теплопроводность при стационарном режиме. Анализ переноса теплоты теплопроводностью через плоские, цилиндрические и сферические стенки. Расчетные соотношения. Задачи теплопроводности при наличии объемного тепловыделения. Интенсификация теплопередачи за счет оребрения поверхности. Эффективность оребрения. Расчет передачи теплоты	12	12	6	18	48

		вдоль стержней и ребер. Теплопроводность при нестационарном режиме. Классификация нестационарных процессов. Анализ нагрева (охлаждения) полуограниченного массива, пластины, цилиндра и шара. Основы теории регулярного теплового режима Принципы моделирования процессов теплопроводности.					
3	Конвективный теплообмен	Общие положения. Классификация и характеристика процессов конвективного теплообмена. Коэффициент теплоотдачи. Силы, действующие в жидкостях. Физические свойства жидкостей, влияющие на теплоотдачу. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена. Основы теории подобия и моделирования. Понятие физического подобия процессов. Свойства подобных процессов. Критерии подобия и уравнения подобия. Обобщение экспериментальных данных и методы моделирования процессов конвективного теплообмена. Основные понятия и соотношения теории пограничного слоя. Теплообмен при внешнем обтекании тел. Анализ гидродинамики и теплообмена при продольном обтекании пластины на основе соотношений теории пограничного слоя. Расчет теплоотдачи при ламинарном движении теплоносителя в пограничном слое. Теплоотдача при турбулентном пограничном слое. Теплоотдача в трубах и каналах. Анализ теплообмена при ламинарном режиме движения, начальный тепловой участок и зона стабилизации теплообмена. Закономерности теплообмена при турбулентном течении. Теплообмен при свободной конвекции. Анализ теплообмена на основе соотношений теории пограничного слоя. Основные закономерности при ламинарном режиме для вертикальных пластин, труб и горизонтальных труб. Теплоотдача при турбулентном движении теплоносителя в пристеночном слое. Расчетные соотношения. Анализ процесса естественной конвекции	18	18	12	18	66

		в узких зазорах, методы расчета. Закономерности теплообмена при поперечном обтекании труб и пучков труб.					
4	Теплообмен при фазовых превращениях	Общие положения. Классификация процессов фазовых превращений. Соотношения баланса полных потоков вещества, импульсов и энергии на границе раздела фаз при фазовых переходах. Теплообмен при конденсации пара Пленочный и капельный режимы конденсации. Теория Нуссельта для процесса пленочной конденсации и ее последующие уточнения. Расчетные соотношения. Теплообмен при турбулентном режиме течения конденсатной пленки. Особенности конденсации пара внутри труб. Механизм и теплообмен при капельной конденсации пара. Теплообмен при кипении жидкости. Режимы кипения. Механизм и теплоотдача при пузырьковом режиме кипения. Гидродинамическая теория первого кризиса кипения. Механизм и теплоотдача при пленочном режиме кипения. Второй кризис процесса кипения. Особенности теплообмена при плавлении и сублимации. Упрощенные схемы процессов Анализ условий переноса теплоты и закономерности теплообмена.	16	16		12	44
5	Теплообмен излучением	Основные понятия и законы. Природа теплового излучения. Поглощательная, отражательная и пропускная способности тел. Виды лучистых потоков. Спектр излучения черного тела - закон Планка, Интегральное излучение черного тела. Закон Стефана-Больцмана, Излучательная способность и степень черноты. Закон Кирхгофа. Интенсивность излучения и закон Ламберта. Теплообмен излучением в диатермичной среде. Перенос теплоты в системе, ограниченной серыми поверхностями. Частные случаи. Теплообмен излучением между произвольно расположенными в пространстве поверхностями. Взаимные поверхности и угловые коэффициенты. Тепловое	12	12		12	36

		излучение газа. Особенности излучения и поглощения газов. Основное уравнение переноса лучистой энергии в поглощающей среде. Спектральная и интегральная степени черноты объема газа. Метод расчета лучистого теплообмена между газовым объемом и поверхностью твердого тела. Сложный теплообмен как совокупность процессов теплопроводности, конвекции и излучения. Особенности теплообмена излучением при криотемпературах.					
6	Расчет теплообменных аппаратов	Классификация теплообменных аппаратов. Основные положения и уравнения теплового расчета. Средняя разность температур и методы ее вычисления. Расчет конечных температур рабочих жидкостей. Методы определения температур поверхности теплообмена. Тепловой расчет регенеративных теплообменных аппаратов. Задачи гидромеханического расчета теплообменных аппаратов. Гидравлические сопротивления элементов теплообменного аппарата. Расчет мощности, необходимой для перемещения жидкости.	8	8		12	28
<b>Экзамен</b>						<b>36</b>	<b>36</b>
<b>Итого</b>			<b>72</b>	<b>72</b>	<b>18</b>	<b>90</b>	<b>180</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

### Теплопроводность

№1 Определение теплопроводности газов методом нагретой нити (6 ч);

### Конвективный теплообмен

№2 Исследование теплоотдачи от горизонтального цилиндра при свободной конвекции воздуха (6 ч);

№3 Исследование теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в трубе (6 ч).

## 6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины предусматривает выполнение курсовой работы на тему «Расчет рекуперативного теплообменного аппарата непрерывного действия».

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины предусматривает выполнение курсовой работы в 4 семестре для очной формы обучения.

Примерная тематика курсового проекта: «Расчет рекуперативного теплообменного аппарата непрерывного действия». Расчет выполняется по различным исходным данным (для разных вариантов отличается назначение теплообменного аппарата, тип теплоносителей, температурные режимы, расходы), что обеспечивает многовариантность выполнения курсового проекта.

Задачи, решаемые при выполнении курсового проекта:

- 1) тепловой расчет теплообменного аппарата;
- 2) гидравлический расчет теплообменного аппарата;
- 3) конструктивный расчет теплообменного аппарата.

Курсовая работа включает в себя графическую часть и расчетно-пояснительную записку.

## 7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### 7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

#### 7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ОПК-1	Знать способы расчета количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь выполнять расчеты количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик	Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками расчета количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

#### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 3, 4 семестре для очной формы обучения по двух/четырёхбалльной системе:

«зачтено»

«не зачтено»

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Зачтено	Не зачтено
ОПК-1	Знать способы расчета количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик	Тест	Выполнение теста на 60-100%	В тесте менее 60% правильных ответов
	Уметь выполнять расчеты количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик	Тест	Выполнение теста на 60-100%	В тесте менее 60% правильных ответов
	Владеть навыками расчета количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик	Тест	Выполнение теста на 60-100%	В тесте менее 60% правильных ответов

ИЛИ

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ОПК-1	Знать способы расчета количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик	Тест	Выполнение теста на 85-100%	Выполнение теста на 70-85%	Выполнение теста на 50-70%	В тесте менее 50% правильных ответов
	Уметь выполнять расчеты количественных характеристик процессов, протекающих в	Тест	Выполнение теста на 85-100%	Выполнение теста на 70-85%	Выполнение теста на 50-70%	В тесте менее 50% правильных ответов

элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик						
Владеть навыками расчета количественных характеристик процессов, протекающих в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования на основе существующих методик	Тест	Выполнение теста на 85-100%	Выполнение теста на 70-85%	Выполнение теста на 50-70%	В тесте менее 50% правильных ответов	

## 7.2 Примерный перечень оценочных средств ( типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

### 7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Передача теплоты при непосредственном соприкосновении тел или внутри твердого тела, обусловленная тепловым движением микрочастиц, называется:

- а) теплоотдачей;
- б) теплопроводностью;**
- в) теплопередачей;
- г) температуропроводностью;
- д) теплообменом

2. Существуют следующие физически элементарные способы передачи теплоты:

- а) конвекция, теплопередача, лучистый теплообмен;
- б) теплопроводность, конвективный теплообмен, излучение;
- в) лучистый теплообмен, конвекция, теплопроводность;**
- г) теплоотдача, конвекция, лучистый теплообмен

3. Температурное поле – это:

а) количество теплоты, передаваемое в единицу времени через единицу поверхности;

б) геометрическое место точек, имеющих в данный момент времени одинаковую температуру;

**в) совокупность значений температур во всех точках рассматриваемого тела в данный момент времени;**

г) тепловая энергия, передаваемая от одного тела к другому в течение какого-то времени.

4. Закон распределения температуры внутри тела в начальный момент времени задается с помощью следующих условий однозначности:

- а) физических;
- б) геометрических;
- в) граничных;
- г) **начальных.**

5. При прохождении теплового потока через однослойную плоскую стенку с постоянным коэффициентом теплопроводности в условиях стационарного теплового режима изменение температуры в стенке будет происходить:

- а) по экспоненте;
- б) по гиперболе;
- в) по логарифмической кривой;
- г) **по прямой линии;**
- д) по параболе.

6. Конвективный теплообмен – это сложный вид теплообмена, при котором совместно протекают процессы:

- а) теплообмена и массообмена;
- б) конвекции и теплоотдачи;
- в) **теплопроводности и конвекции;**
- г) теплопередачи и конвекции.

7. Тонкий слой жидкости вблизи поверхности тела, в котором происходит изменение скорости жидкости от значения скорости невозмущенного потока вдали от стенки до нуля, непосредственно на стенке, называется:

- а) тепловым пограничным слоем;
- б) **гидродинамическим пограничным слоем;**
- в) ламинарным подслоем турбулентного пограничного слоя;
- г) турбулентным подслоем ламинарного пограничного слоя.

8. В уравнении теплоотдачи Ньютона-Рихмана удельный тепловой поток равен произведению коэффициента теплоотдачи на разность температур:

- а) наружной и внутренней поверхностей стенки;
- б) горячего и холодного теплоносителей;
- в) **поверхности твердого тела и текущей жидкости;**
- г) внутренней и наружной поверхностей стенки;

9. Критерий подобия Грасгофа характеризует:

- а) режим движения жидкости;
- б) теплообмен на границе жидкость-стенка;
- в) соотношение между теплопроводностью и конвекцией;
- г) нестационарность процессов;

- д) физические свойства жидкости;
- е) свободную конвекцию.

10. Если коэффициент теплоотдачи третьего ряда коридорного пучка труб принять за 100%, то коэффициент теплоотдачи второго ряда этого пучка составит:

- а) 60%;
- б) 80%;
- в) 70%;
- г) **90%**.

### 7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали  $450 \text{ Вт/м}^2$ . Температура поверхности под изоляцией  $t_{c1} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура внешней поверхности изоляции  $t_{c2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить толщину изоляции, если  $\lambda = 0,09 + 0,0000874t$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

2. Вычислить тепловые потери через  $1 \text{ м}^2$  двухслойной плоской стенки и температуру в плоскости соприкосновения слоев, если известно:  $\delta_1 = 125 \text{ мм}$ ;  $\delta_2 = 500 \text{ мм}$ ;  $t_{c1} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{c3} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_1 = 0,28 + 0,00023t$ ;  $\lambda_2 = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

3. Определить тепловые потери через  $1 \text{ м}$  длины трехслойной цилиндрической стенки и температуры на границе соприкосновения слоев если известно:  $\delta_1 = 5 \text{ мм}$ ;  $\delta_2 = \delta_3 = 50 \text{ мм}$ ;  $\lambda_1 = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\lambda_2 = 0,06 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\lambda_3 = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $t_{c1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{c4} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $d = 100 \text{ мм}$ .

4. Вычислить потери теплоты с  $1 \text{ м}$  неизолированного трубопровода диаметром  $d_1/d_2 = 150/160 \text{ мм}$ , проложенного на открытом воздухе, если внутри трубы протекает вода со средней температурой  $t_{ж1} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  и температурой окружающего воздуха  $t_{ж2} = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для материала трубы  $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\alpha_2 = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Определить также температуру на внешней и внутренней поверхностях трубы.

5. Определить время, необходимое для нагрева листа стали толщиной  $2\delta = 24 \text{ мм}$ , который имел начальную температуру  $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , а затем помещён в печь с температурой  $t_{ж} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Нагрев считать законченным, когда температура листа достигнет значения  $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для стали:  $\lambda = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $c_p = 0,502 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\alpha = 23,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

6. Длинный стальной вал диаметром  $d = 2 r_0 = 120 \text{ мм}$ , имеющий температуру  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  помещён в печь с  $t_{ж} = 820 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить время нагрева вала

до  $t_{r=0} = 800$  °С. Определить также температуру на поверхности вала  $t_{r=r_0}$  в конце нагрева.  $\lambda = 21$  Вт/(м·К);  $a = 6,11 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\alpha = 140$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

7. Стальной параллелепипед размером 200x400x500 мм, имел начальную температуру  $t_0 = 20$  °С, затем был помещён в печь с температурой  $t_{ж} = 1400$  °С. Определить температуру в центре слитка через 1,5 часа после загрузки в печь.

$\lambda = 37,2$  Вт/(м·К);  $a = 6,94 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\alpha = 168$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

8. Стальная цилиндрическая болванка диаметром 80 мм и длиной 160 мм была равномерно нагрета до  $t_0 = 800$  °С. Болванка охлаждается на воздухе с  $t_{ж} = 30$  °С. Определить температуру в центре болванки и в середине торцевой поверхности через 30 мин после начала охлаждения.  $\lambda = 23,3$  Вт/(м·К);  $a = 6,11 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\alpha = 118$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

9. Определить коэффициент теплоотдачи от вертикальной плиты высотой  $H = 2$  м, к окружающему воздуху, если температура поверхности плиты  $t_c = 100$  °С, температура окружающего воздуха вдали от поверхности  $t_{ж} = 20$  °С.

10. Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности труб, расположенных горизонтально в большом баке, к маслу, если диаметр труб  $d = 20$  мм, температура масла  $t_{ж} = 60$  °С, температура поверхности труб  $t_c = 90$  °С. Расчёт можно производить как для одиночного цилиндра.

### 7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Определить значение коэффициента теплоотдачи и количество передаваемой теплоты за 1 с при течении воды в горизонтальной трубе диаметром  $d = 10$  мм и длиной  $l = 1,2$  м, если средние по длине температура воды и стенки трубы равны соответственно  $t_{ж} = 30$  °С и  $t_c = 60$  °С, расход воды  $G = 7 \cdot 10^{-3}$  кг/с.

2. Какой длины необходимо использовать трубу диаметром  $d = 18$  мм для нагрева воды от  $t_{ж}' = 5$  °С до  $t_{ж}'' = 55$  °С, температура стенки трубы  $t_c = 70$  °С, расход воды  $G = 72$  кг/ч.

3. Определить коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к охлаждающей воде, если температура стенки  $t_c = 28$  °С, внутренний диаметр трубки  $d = 16$  мм,  $t_{ж}' = 10$  °С,  $t_{ж}'' = 18$  °С, средняя скорость воды в трубке  $w = 2$  м/с.

4. По трубке внутренним диаметром  $d = 18$  мм движется вода со скоростью  $w = 1,2$  м/с. Температура стенки трубки  $t_c = 90$  °С, вода нагревается от

$t_{ж}' = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $t_{ж}'' = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи от трубки к воде и плотность теплового потока. Принять, что  $l > 50 d$ .

5. Трубка диаметром  $d = 20 \text{ мм}$  охлаждается потоком воды. Скорость потока  $w = 1 \text{ м/с}$ . Средняя температура воды  $t_{ж} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и температура стенки трубки

$t_c = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности трубки к охлаждающей воде.

6. Шахматный пучок труб обтекается поперечным потоком трансформаторного масла. Внешний диаметр труб  $d = 20 \text{ мм}$ , скорость потока  $w = 0,6 \text{ м/с}$  и  $t_{ж} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура стенки трубок  $t_c = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поток обтекает трубки под углом атаки  $\varphi = 90^{\circ}$ . Определить коэффициент теплоотдачи.

7. Коридорный пучок труб обтекается потоком трансформаторного масла. Внешний диаметр труб  $d = 20 \text{ мм}$ , скорость потока  $w = 0,6 \text{ м/с}$  и  $t_{ж} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура стенки трубок  $t_c = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поток обтекает трубки под углом атаки  $\varphi = 90^{\circ}$ . Определить коэффициент теплоотдачи.

8. Шахматный пучок труб обтекается поперечным потоком воды. Внешний диаметр труб  $d = 20 \text{ мм}$ , скорость потока  $w = 0,6 \text{ м/с}$  и  $t_{ж} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура стенки трубок  $t_c = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поток обтекает трубки под углом атаки  $\varphi = 45^{\circ}$ . Определить коэффициент теплоотдачи.

9. На наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром  $d = 20 \text{ мм}$  и длиной  $l = 2 \text{ м}$  конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении  $P = 10^5 \text{ Па}$ . Температура поверхности трубы  $t_c = 94,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить средний коэффициент теплоотдачи от пара к трубе и количество конденсирующегося пара.

10. На наружной поверхности вертикальной трубы диаметром  $d = 20 \text{ мм}$  и высотой  $h = 2 \text{ м}$  конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении  $P = 10^5 \text{ Па}$ . Температура поверхности трубы  $t_c = 94,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить средний по высоте коэффициент теплоотдачи от пара к трубе и количество конденсирующегося пара.

#### **7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету**

1. Явление отрыва пограничного слоя. Влияние гидродинамики потока на локальную и среднюю теплоотдачу.

2. Теплоотдача при течении газов с большой скоростью.

3. Жидкометаллический теплоносители, теплоотдача.
4. Теплоотдача в разреженных газах.
5. Пленочная и капельная конденсация. Термические сопротивления при конденсации. Условия взаимодействия на границе раздела фаз.
6. Влияние скорости пара при конденсации. Конденсация на горизонтальных трубах и пучках труб.
7. Теплообмен при конденсации практически неподвижного пара в условиях ламинарного и турбулентного режимов течения пленки конденсата.
8. Кипение в большом объеме. Пузырьковый и пленочный режимы. Условия возникновения паровой фазы, критический радиус пузырька. Число центров парообразования.
9. Механизм теплоотдачи и расчетные соотношения при пузырьковом режиме кипения. Расчет критической плотности теплового потока.
10. Структура двухфазного потока и теплообмена при кипении внутри труб. Кризис кипения.
11. Теплообмен при сублимации вещества.
12. Тепломассообмен при конденсации смеси паров и пара из парогазовой смеси. Зависимость интенсивности теплообмена от содержания неконденсирующегося компонента.

### **7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену**

1. Физический механизм процесса теплопроводностью в различных средах. Температурное поле, градиент температуры, плотность теплового потока.
2. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности, его зависимость от различных факторов.
3. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Линейные и нелинейные задачи.
4. Теплопроводность плоской стенки с постоянным и зависящим от температуры коэффициентом теплопроводности.

5. Теплопередача через многослойную стенку. Коэффициент теплопередачи. Термические сопротивления.
6. Теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку. Критический диаметр. Понятие об оптимизации тепловой изоляции.
7. Теплопроводность в стержне (ребре) постоянного поперечного сечения.
8. Нестационарная теплопроводность пластины при граничных условиях третьего рода.
9. Нестационарная теплопроводность длинного цилиндра. Теплопроводность тел конечных размеров (параллелепипед, цилиндр).
10. Определение количества теплоты, отдаваемого или воспринимаемого телом в процессе нестационарной теплопроводности.
11. Конвективный теплообмен как совокупность молекулярного и молярного переноса теплоты. Теплоотдача. Понятие о тепловом пограничном слое. Особенности теплообмена при ламинарном и турбулентном режимах течения.
12. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена: уравнения энергии, движения и сплошности. Краевые условия.
13. Теория подобия. Безразмерные комплексы (критерии подобия).
14. Теплоотдача при конвекции в большом объеме и обобщение методами теории подобия. Расчетные соотношения.
15. Теплоотдача при свободной конвекции в ограниченном пространстве.
16. Образование теплового и гидродинамического пограничных слоев при неизотермическом течении с большими критериями Пекле и Рейнольдса.
17. Простейшая модель турбулентности. Законы сопротивления и теплообмена при турбулентном течении.
18. Теплоотдача при турбулентном режиме. Теплоотдача при турбулентном обтекании плоской пластины.
19. Теплообмен в трубах при ламинарном течении. Гидродинамическая и тепловая стабилизация.

20. Теплообмен в трубах при турбулентном течении. Гидродинамическая и тепловая стабилизация.

21. Влияние шероховатости и изгиба труб на теплоотдачу. Теплоотдача в каналах некруглого поперечного сечения.

22. Теплоотдача при поперечном обтекании труб и пучков труб. Режимы течения.

23. Средний температурный напор.

24. Анализ решения задачи нестационарной теплопроводности пластины в предельных случаях малых и больших чисел Био и Фурье. Регулярный режим.

25. Дифференциальное уравнение энергии.

26. Дифференциальное уравнение движения (Навье-Стокса).

27. Формулировка краевых задач теплопроводности: начальные условия, граничные условия четырех родов.

28. Явление отрыва пограничного слоя. Влияние гидродинамики потока на локальную и среднюю теплоотдачу.

29. Теплоотдача при течении газов с большой скоростью.

30. Жидкометаллический теплоносители, теплоотдача.

31. Теплоотдача в разреженных газах.

32. Пленочная и капельная конденсация. Термические сопротивления при конденсации. Условия взаимодействия на границе раздела фаз.

33. Влияние скорости пара при конденсации. Конденсация на горизонтальных трубах и пучках труб.

34. Теплообмен при конденсации практически неподвижного пара в условиях ламинарного и турбулентного режимов течения пленки конденсата.

35. Кипение в большом объеме. Пузырьковый и пленочный режимы. Условия возникновения паровой фазы, критический радиус пузырька. Число центров парообразования.

36. Механизм теплоотдачи и расчетные соотношения при пузырьковом режиме кипения. Расчет критической плотности теплового потока.

37. Структура двухфазного потока и теплообмена при кипении внутри труб. Кризис кипения.

38. Теплообмен при сублимации вещества.

39. Тепломассообмен при конденсации смеси паров и пара из парогазовой смеси. Зависимость интенсивности теплообмена от содержания неконденсирующегося компонента.

40. Аналогия между процессами переноса массы и теплоты. Величины - аналоги. Методика приближенного определения коэффициента массоотдачи на основе аналогии.

41. Дифференциальные уравнения конвективного массообмена в двухкомпонентных средах. Краевые условия. Коэффициент массоотдачи.

42. Характеристики двухкомпонентных сред. Потoki массы компонентов смеси. Концентрационная диффузия. Закон Фика. Перенос теплоты в двухкомпонентных средах.

43. Применение законов излучения к серым телам.

44. Расчет лучистого теплообмена между излучающей средой и поверхностью твердого тела.

45. Особенности теплообмена излучением в поглощающей среде (газах и парах).

46. Теплообмен излучением в замкнутой системе серых тел. Частные случаи: тела с плоскопараллельными поверхностями и экранами между ними; тела, одно из которых находится в полости другого.

47. Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой.

48. Поглощательная, отражательная и пропускательная способности тел. Абсолютно черное тело. Законы излучения черного тела. Серые тела.

49. Основные понятия и законы теплового излучения.

50. Типы теплообменных устройств. Основные уравнения теплового расчета теплообменных аппаратов.

#### **7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации**

Зачет проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов, 5 стандартных задач и 5 прикладных задач. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, правильно решенная задача оценивается в 2 балла. Максимальное количество набранных баллов – 30.

1. Зачет ставится в случае, если студент набрал от 18 до 30 баллов.
2. Незачет ставится, если студент набрал менее 18 баллов.

Экзамен проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов, 5 стандартных задач и 5 прикладных задач. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, правильно решенная задача оценивается в 2 балла. Максимальное количество набранных баллов – 30.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 15 баллов.
2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 15 до 20 баллов
3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 21 до 25 баллов.
4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 26 до 30 баллов.

### 7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Основные положения учения о теплопередаче	ОПК-1	Тест, устный опрос, зачет, экзамен
2	Теплопроводность	ОПК-1	Тест, защита лабораторных работ, устный опрос, зачет, экзамен
3	Конвективный теплообмен	ОПК-1	Тест, защита лабораторных работ, устный опрос, зачет, экзамен
4	Теплообмен при фазовых превращениях	ОПК-1	Тест, устный опрос, зачет, экзамен
5	Теплообмен излучением	ОПК-1	Тест, устный опрос, зачет, экзамен
6	Расчет теплообменных аппаратов	ОПК-1	Тест, устный опрос, зачет, экзамен

### 7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Защита курсового проекта осуществляется согласно требованиям, предъявляемым к работе, описанным в методических материалах. Примерное время защиты на одного студента составляет 20 мин.

## **8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)**

### **8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

1. Трошин А.Ю. Конструктивный и поверочный расчеты низкотемпературных теплообменных аппаратов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Ю. Трошин, С.В. Дахин. - Воронеж: ВГТУ, 2003.

2. Михеев М.А. Основы теплопередачи / Михеев М.А., Михеева И.М. - 3-е изд., репринт. - Москва: Бастет, 2010. - 342 с.

3. Исаченко В.П. Теплопередача: Учебник / В. П. Исаченко, В. А. Осипова. - 5-е изд., стереотип. - М.: Арис, 2013. - 416 с.

4. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче: учебное пособие / Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. - 4-е изд., перераб.; репринт. изд. - Москва: Транспортная компания, 2016. - 287 с.

5. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Тепломассообмен» для студентов специальности 070200 «Технологические системы жизнеобеспечения АЭС и промышленных предприятий» дневной формы обучения [Текст]/ Каф. теоретической и промышленной теплоэнергетики; Сост.: А.Ю. Трошин, С.В. Дахин. - Воронеж: ВГТУ, 2003. – 26 с.

**8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:**

- SMath Studio

- Mathcad
- Advanced Grapher
- Microsoft Windows 10
- Microsoft Office 2013/2007
- Elcut
- Виртуальные лабораторные стенды LABWORKS
- <https://elibrary.ru>
- <https://cchgeu.ru>

## **9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

- Специализированная лекционная аудитория, оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой;
- дисплейный класс, оснащенный компьютерными программами для проведения практических и лабораторных работ.

## **10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

По дисциплине «Тепломассообмен» читаются лекции, проводятся практические занятия и лабораторные работы, выполняется курсовая работа.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета энергетических машин и установок. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Методика выполнения курсовой работы изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсовой работы должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой курсовой работы, защитой курсовой работы.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.

Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: следует разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом, экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.