

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

**Направление подготовки/специальность: 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика**

**Наименование образовательной программы: Теплофизика и молекулярная физика**

**Уровень образования: высшее образование - магистратура**

**Форма обучения: Очная**


**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Теплопередача в промышленных аппаратах**

**Москва  
2022**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Минко К.Б.
	Идентификатор	Rесbаdeаb-MinkоKB-6с41f784

(подпись)


К.Б. Минко

(расшифровка  
подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

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


(подпись)

Г.Г. Яньков

(расшифровка  
подписи)

Заведующий  
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

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

(подпись)

Д.Н.

Герасимов

(расшифровка  
подписи)

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-2 Способен владеть расчетно-теоретическими и экспериментальными методами исследования теплогидравлических процессов в энергетическом оборудовании

ИД-2 Владеет расчетно-теоретическими методами анализа процессов в энергетическом оборудовании

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Письменная работа

1. Общая теория теплообменников (Контрольная работа)

2. Основные закономерности гидродинамики и теплообмена в аппаратах с фазовым переходом одного из теплоносителей (Контрольная работа)

3. Рекуперативные поверхностные теплообменники с однофазным теплоносителем (Контрольная работа)

4. Рекуперативные поверхностные теплообменники с фазовым переходом одного из теплоносителей (Контрольная работа)

Форма реализации: Проверка задания

1. Типовой расчет (Индивидуальный проект)

## БРС дисциплины

2 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %					
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
	Срок КМ:	4	7	11	14	15
Общая теория теплообменников						
Введение	+					
Общая теория теплообменников	+					
Рекуперативные поверхностные теплообменники с однофазным теплоносителем						
Рекуперативные поверхностные теплообменники с однофазным теплоносителем			+			
Основные закономерности гидродинамики и теплообмена в аппаратах с фазовым переходом одного из теплоносителей						

Основные закономерности гидродинамики и теплообмена в аппаратах с фазовым переходом одного из теплоносителей			+		
Рекуперативные поверхностные теплообменники с фазовым переходом одного из теплоносителей. Регенеративные и специальные теплообменники.					
Рекуперативные поверхностные теплообменники с фазовым переходом одного из теплоносителей				+	+
Регенеративные и специальные теплообменники					+
Вес КМ:	20	20	20	20	20

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

## СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-2	ИД-2ПК-2 Владеет расчетно-теоретическими методами анализа процессов энергетическом оборудовании	Знать: особенности теплогидравлических процессов при фазовых превращениях общую теорию теплообменников конструкцию теплообменников с фазовым переходом конструкцию рекуперативных поверхностных теплообменников с однофазным теплоносителем Уметь: анализировать и рассчитывать теплогидравлические процессы при фазовых превращениях анализировать и рассчитывать процессы в рекуперативных	Общая теория теплообменников (Контрольная работа) Рекуперативные поверхностные теплообменники с однофазным теплоносителем (Контрольная работа) Основные закономерности гидродинамики и теплообмена в аппаратах с фазовым переходом одного из теплоносителей (Контрольная работа) Рекуперативные поверхностные теплообменники с фазовым переходом одного из теплоносителей (Контрольная работа) Типовой расчет (Индивидуальный проект)

		поверхностных теплообменниках с однофазным теплоносителем анализировать и рассчитывать теплогидравлические процессы в теплообменниках с фазовым переходом анализировать и рассчитывать процессы в рекуперативных поверхностных теплообменниках с фазовым переходом одного из теплоносителей	
--	--	---	--

## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

### КМ-1. Общая теория теплообменников

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Работа проводится письменно. Время выполнения 1 академический час.

#### Краткое содержание задания:

Контрольная работа состоит из 10 вопросов на знания по содержанию раздела "Общая теория теплообменников"

#### Контрольные вопросы/задания:

Знать: общую теорию теплообменников	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Как изменяются среднемассовые температуры теплоносителей по длине идеального противоточного теплообменника в зависимости от соотношения водяных эквивалентов теплоносителей?</li><li>2. Опишите основные этапы расчета теплообменников с помощью методики «эффективность - число единиц переноса» и поправки для средней разности температур.</li><li>3. Выведите формулу для эффективности идеального прямоточного теплообменника. Как зависит данная эффективность от числа единиц переноса и соотношения водяных эквивалентов теплоносителей?</li><li>4. Выведите формулу для эффективности идеального противоточного теплообменника. Как зависит данная эффективность от числа единиц переноса и соотношения водяных эквивалентов теплоносителей?</li><li>5. Дайте определение среднего температурного напора в идеальном прямоточном теплообменнике.</li></ol>
-------------------------------------	--

#### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

### КМ-2. Рекуперативные поверхностные теплообменники с однофазным теплоносителем

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Работа проводится письменно. Время выполнения 2 академических часа. Студентам раздается раздаточный материал с таблицами теплофизических свойств и номограммами для данного класса теплообменных аппаратов.

**Краткое содержание задания:**

Контрольная работа состоит из вопроса на знание конструкции рекуперативных поверхностных теплообменников с однофазным теплоносителем и двух задач на умение анализировать и рассчитывать процессы в данных аппаратах.

**Контрольные вопросы/задания:**

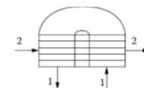
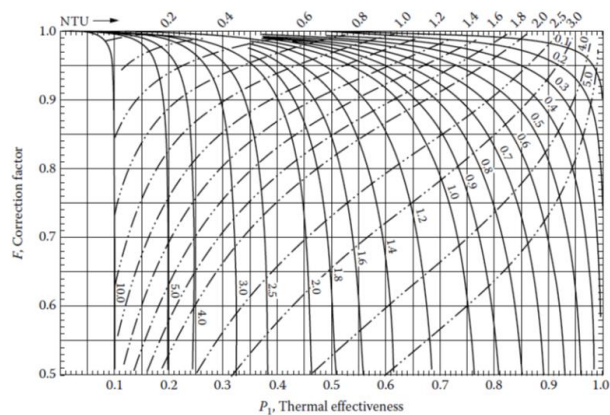
<p>Знать: конструкцию рекуперативных поверхностных теплообменников с однофазным теплоносителем</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Теплообменники типа «труба в трубе». Особенности конструкции.</li><li>2. Кожухотрубные теплообменники. Особенности конструкции.</li><li>3. Пластинчатые и спиральные теплообменники. Особенности конструкции.</li><li>4. Пластинчато-ребристые (компактные) теплообменники. Особенности конструкции.</li><li>5. Теплообменники из изогнутых труб: змеевиковые аппараты, теплообменники из спиральных и витых труб. Особенности конструкции.</li><li>6. Теплообменники воздушного охлаждения. Особенности конструкции.</li></ol>
<p>Уметь: анализировать и рассчитывать процессы в рекуперативных поверхностных теплообменниках с однофазным теплоносителем</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. В маслоохладитель поступает масло с температурой 90 С и расходом 10 кг/с. Теплоемкость масла 2 кДж/(кг·К). Холодный теплоноситель - вода с теплоемкостью 4,2 кДж/(кг·К), расходом 20 кг/с и входной температурой 15 С. Предполагая, что площадь теплообменной поверхности равна 200 м<sup>2</sup> и значение коэффициента теплопередачи 150 Вт/(м<sup>2</sup>К), найдите выходные температуры теплоносителей для двухходового кожухотрубчатого ТА. Оцените <math>\epsilon_{\Delta T}</math>.</li><li>2. Требуется рассчитать конденсатор для конденсации органического теплоносителя с теплотой парообразования 250 кДж/кг и расходом 5 кг/с. Пар насыщенный и можно считать, что конденсация происходит при постоянной температуре 80 С. Тепло отводится водой, которая нагревается от 20 С до 35 С. Коэффициент теплопередачи 760 Вт/(м<sup>2</sup>К). Рассчитайте расход охлаждающей воды, средний перепад температур и площадь теплообмена. Чему равно <math>\epsilon_{\Delta T}</math> для данного случая?</li><li>3. Имеется ТА с площадью теплообмена 600 м<sup>2</sup> и коэффициентом теплопередачи равным 60 Вт/(м<sup>2</sup>К). В него поступают:<ul style="list-style-type: none"><li>-поток воздуха с расходом 12 кг/с, теплоемкостью 1050 Дж/(кг·К) и температурой на входе 20 С,</li><li>-поток масла с расходом 3 кг/с, теплоемкостью 2000 Дж/(кг·К) и температурой на входе 80 С.</li></ul></li></ol>



Рассчитайте выходные температуры теплоносителей, поправочный фактор  $\epsilon_{\Delta T}$  и термодинамическую эффективность.

Рассмотреть две схемы организации течения: двухходовой кожухотрубчатый ТА и ТА с перекрестным током и несмешивающимися теплоносителями.

4. Рассчитать параметры теплоносителей на выходе из существующего теплообменного аппарата (ТА) и теплопроизводительность ТА. ТА представляет собой трубчатый двухходовой воздухоподогреватель пароводяного котла, в котором воздух в количестве 900,0 кг/ч с температурой равной 20 С подогревается за счет тепла, отводимого от горячих дымовых газов (13% CO<sub>2</sub>, 11% H<sub>2</sub>O, 76% N<sub>2</sub>). Дымовые газы с расходом 900,0 кг/ч движутся внутри стальных трубок диаметром 18/15 мм с начальной температурой 200 С. Трубы расположены в вершинах равностороннего треугольника со стороной равной 1,1\*18 мм. Длина труб 2,5 м, количество труб в одном ряду 10, количество рядов по ходу движения воздуха 8 (4 ряда в трубном пучке). Номограмма для данного теплообменника представлена на рисунке. Параметр P<sub>1</sub> определяется как отношение разности между температурой воздуха на выходе и на входе к максимальной разности температур внутри теплообменника (между входом горячего и холодного теплоносителей).



1 – воздух, 2 – дымовые газы

Номограмма воздухоподогревателя пароводяного котла

#### Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка:* 3

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

### **КМ-3. Основные закономерности гидродинамики и теплообмена в аппаратах с фазовым переходом одного из теплоносителей**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Работа проводится письменно. Время выполнения 1 академический час.

#### **Краткое содержание задания:**

Контрольная работа состоит из 5 задач. 2 задачи проверяют знание Основных закономерностей гидродинамики и теплообмена в аппаратах с фазовым переходом одного из теплоносителей. Оставшиеся три проверяют умение проводить оценки.

#### **Контрольные вопросы/задания:**

<p>Знать: особенности теплогидравлических процессов при фазовых превращениях</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Что такое массовое расходное газосодержание (паросодержание)?</li><li>2.Что такое фактор скольжения <math>\phi</math>? Покажите, как соотносятся <math>\beta</math> и <math>\phi</math> при <math>\phi &gt; 1</math>.</li><li>3.Как изменяется скорость циркуляции по длине канала при наличии теплообмена?</li><li>4.Что такое гомогенная плотность смеси?</li><li>5. Выведите выражение для определения скорости смеси через <math>x</math>, <math>w_0</math> и плотности фаз.</li><li>6.Что такое балансовое паросодержание <math>x_b</math> ?</li></ol>
<p>Уметь: анализировать и рассчитывать теплогидравлические процессы при фазовых превращениях</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Рассчитайте сопротивление трения пароводяного потока при давлении 4,9 МПа, плотности массового потока 2000 кг/(м<sup>2</sup>с) и массовом расходном паросодержании 0,1. Диаметр канала 8 мм.</li><li>2.Внутренний диаметр вертикальной трубы 15 мм, среда находится в состоянии насыщения при давлении 0,35 МПа. Скорость циркуляции 0,8 м/с, расходное массовое паросодержание – 0,0094. Оцените истинное объемное паросодержание при подъемном течении.</li><li>3.В вертикальной трубе диаметром 95,3 мм движется водо-воздушный поток. Скорость воздуха 68 м/с, толщина пленки 0,2 мм. В системе атмосферное давление. Оцените коэффициент трения на межфазной границе.</li></ol>

#### **Описание шкалы оценивания:**

*Оценка:* 5

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

#### КМ-4. Рекуперативные поверхностные теплообменники с фазовым переходом одного из теплоносителей

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Работа проводится письменно. Время выполнения 2 академических часа.

#### Краткое содержание задания:

Контрольная работа состоит из 2 задач. Студентам раздается раздаточный материал с таблицами теплофизических свойств и номограммами для данного класса теплообменных аппаратов.

#### Контрольные вопросы/задания:

Уметь: анализировать и рассчитывать процессы в рекуперативных поверхностных теплообменниках с фазовым переходом одного из теплоносителей	<p>1. Рассчитать паропроизводительность и потери давления экспериментального парогенератора. Парогенератор представляет собой одноходовой кожухотрубчатый теплообменник. Греющая среда – пароводяная смесь <math>G_2=42</math> т/час, <math>P_2=1</math> МПа, паросодержанием на входе 0,8 движется по горизонтальным трубам из титана диаметром 18 мм, толщиной стенки 1 мм, длиной 2,7 м; число трубок – 500. В межтрубном пространстве кипит насыщенная вода при давлении <math>P_x=0,6</math> МПа. Экспериментально определено, что паросодержание на выходе из греющей секции равно 0,45.</p> <p>2. Выполнить поверочный расчет (определить температуру питательной воды на выходе, <math>T_{x,2}</math> и расход греющего пара <math>G_2</math>) регенеративного подогревателя питательной воды, представляющего собой вертикальный кожухотрубчатый теплообменник. Питательная вода высокого давления (15 МПа) с температурой <math>T_{x,1} = 110^\circ\text{C}</math>, с расходом <math>G_x = 550</math> т/час поступает в нижнюю камеру и нагревается, проходя по трубам из стали 12X18Н9Т диаметром 18/16 мм, высотой 4,2м. На наружной поверхности труб конденсируется насыщенный водяной пар под давлением 0,6 МПа. Число труб – 660.</p> <p>Указания:</p> <p>1). В расчетах пренебречь участками труб, приходящимися на трубные доски и на слой конденсата в нижней части корпуса;</p> <p>2). Термическое сопротивление отложений принять</p>
--	---

	$R_3=1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ . 3). В первом приближении принять, что средний температурный напор со стороны конденсирующегося пара $\Delta T_{\text{кон}} = T_s - T_{\text{см}, z} = 12,5 \text{ К}$ ; 4). Пренебречь изменением свойств питательной воды по длине трубы и с давлением, а также изменением свойств по толщине конденсатной пленки
--	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

**КМ-5. Типовой расчет**

**Формы реализации:** Проверка задания

**Тип контрольного мероприятия:** Индивидуальный проект

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студентам выдаются задания. В течение 2х недель они должны предоставить отчет по проделанной работе. Отчет должен быть оформлен в соответствии со стандартными требованиям к оформлению результатов НИР.

**Краткое содержание задания:**

Студентам выдается один из двух базовых вариантов с индивидуальными входными данными. В качестве примера (контрольные вопросы на умение) представлено задания по расчету паропроизводительности испарителя.

При защите ведется устный опрос по сданному отчету. Характерные вопросы для представленного примера представлены в контрольных вопросах на знания.

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: конструкцию теплообменников с фазовым переходом	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.Коротко опишите конструкцию теплообменного аппарата и происходящие в нем процессы.</li> <li>2.Как изменяется суммарное падение давления в потоках с подводом тепла? Почему?</li> <li>3.Что такое экономайзерный участок?</li> <li>4.Коротко поясните формулы, используемые при расчете потерь давления в контуре естественной циркуляции.</li> <li>5.Объясните принцип работы жалюзийных сепараторов.</li> </ol>
--	---

<p>Уметь: анализировать и рассчитывать теплогидравлические процессы в теплообменниках с фазовым переходом</p>	<p>Расчитать паропроизводительность (<math>G_1</math>) испарителя, представляющего собой вертикальный кожухотрубчатый теплообменник с внутренним диаметром корпуса <math>D_{вн}</math>. Наружный диаметр греющей секции <math>D_{гр}</math>, высота греющей секции <math>H_1</math>. Число труб <math>N</math>, диаметр и материал указаны в таблице для каждого варианта. Греющий теплоноситель – водяной пар со степенью сухости <math>X_{гр}</math> при давлении <math>P_2</math>, МПа подается в межтрубное пространство. Дистиллированная вода кипит внутри труб, кольцевой зазор между греющей камерой и корпусом представляет собой опускную часть контура естественной циркуляции; давление вторичного пара <math>P_1</math>, МПа. Толщина верхней и нижней трубных досок одинакова и составляет 30 мм. Высота слоя конденсата в нижней части греющей камеры <math>H_2</math>. Определить скорость естественной циркуляции <math>w_0</math> (на входе в трубы греющей секции).</p> <p>1.</p> <table border="1" data-bbox="783 342 1380 398"> <thead> <tr> <th>№</th> <th><math>P_2</math>, МПа</th> <th><math>X_{гр}</math></th> <th><math>P_1</math>, МПа</th> <th><math>N</math></th> <th><math>D_{вн}</math>, мм</th> <th><math>D_{гр}</math>, мм</th> <th>Материал труб</th> <th><math>d_1/d_2</math>, мм</th> <th><math>H_1</math>, мм</th> <th><math>H_2</math>, мм</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.1</td> <td>0,4</td> <td>1,0</td> <td>0,22</td> <td>1700</td> <td>3000</td> <td>2800</td> <td>Ст.20</td> <td>38/33</td> <td>2500</td> <td>120</td> </tr> </tbody> </table>	№	$P_2$ , МПа	$X_{гр}$	$P_1$ , МПа	$N$	$D_{вн}$ , мм	$D_{гр}$ , мм	Материал труб	$d_1/d_2$ , мм	$H_1$ , мм	$H_2$ , мм	1.1	0,4	1,0	0,22	1700	3000	2800	Ст.20	38/33	2500	120
№	$P_2$ , МПа	$X_{гр}$	$P_1$ , МПа	$N$	$D_{вн}$ , мм	$D_{гр}$ , мм	Материал труб	$d_1/d_2$ , мм	$H_1$ , мм	$H_2$ , мм													
1.1	0,4	1,0	0,22	1700	3000	2800	Ст.20	38/33	2500	120													

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 2 семестр

**Форма промежуточной аттестации:** Экзамен

### Пример билета

1. Общая характеристика рекуперативных поверхностных и смесительных теплообменников; принципиальная схема регенеративных теплообменников.
2. Назначение, основные особенности конструкции и работы испарителей с естественной циркуляцией.
3. В воздушном теплообменнике охлаждается трансформаторное масло от температуры  $T_{гвх}$  до  $T_{гвых}$ . Воздух при этом нагревается с  $T_{хвх}$  до  $T_{хвых}$ . Охладитель представляет собой  $n$  ряда горизонтальных труб (по  $N$  труб в каждом ряду) из стали внутренним диаметром  $d$  толщиной стенки  $d_s$ , длиной  $L$ . Внутри труб движется масло. На наружной поверхности труб для интенсификации теплоотдачи установлены круглые алюминиевые ребра диаметра  $D$  и толщиной  $d_r$ . Трубы расположены по углам равносторонних треугольников, с шагом  $S$ . Организовано  $k$  хода по течению горячего теплоносителя. Воздух подается снизу вверх с помощью нагнетающего вентилятора. Известны коэффициенты теплоотдачи  $ag$ ,  $ax$ . Рассчитать теплопроизводительность аппарата..

### Процедура проведения

Студентам выдаются билет из двух вопросов и задачи. Первый вопрос содержит теоретический материал, второй вопрос одному из типов теплообменных аппаратов (ТА). При описании конструкции ТА необходимо ответить (в общем случае) на следующие вопросы: 1. Типичное назначение аппарата, диапазон характерных эксплуатационных параметров (температуры, давления, производительность). 2. Обычно используемые теплоносители. 3. Конструкционные материалы. 4. Диапазон основных конструктивных размеров. 5. Особенности компоновки, типичная схема течения теплоносителей, решение проблемы компенсации температурных напряжений. 6. Особенности расчета теплопередачи. 7. Особенности эксплуатации, очистка от отложений. 8. Для теплообменников с фазовыми превращениями теплоносителей, кроме того, проблемы сепарации пара и жидкости, очистки теплоносителя (продувка, промывка пара), борьбы с отложениями. На ответ на вопросы и решение задачи отводится 1,5 часа. Студентам выдается весь необходимый раздаточный материал.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-2ПК-2 Владеет расчетно-теоретическими методами анализа процессов в энергетическом оборудовании

### Вопросы, задания

1. Начало закипания и теплообмен при кипении в каналах
2. Классификация и общая характеристика теплообменников с парообразованием. Сепарация пара и поддержание чистоты кипящего теплоносителя в испарителях
3. Методика расчета испарителя с естественной циркуляцией кипящего теплоносителя
4. Качественные закономерности кризиса кипения в трубах. Скелетные таблицы рекомендуемых значений КТП при кипении воды в круглых трубах

5. Кризис кипения в каналах при высоких скоростях течения и больших недогревах жидкости
6. Термодинамический кризис кипения в трубах
7. Особенности течения и теплообмена в субмиллиметровых каналах
8. Принципиальная конструкция и основное содержание расчета тепловых труб
9. Теплообменники «труба в трубе»
10. Кожухотрубчатые теплообменники
11. Пластинчатые теплообменники
12. Спиральные теплообменники
13. Пластинчато-ребристые (компактные) теплообменники
14. Витые теплообменники
15. Теплообменники воздушного охлаждения
16. Испарители (системы термической водоподготовки)
17. Основные типы промышленных конденсаторов и особенности их теплового расчета
18. Парогенераторы АЭС с ВВЭР
19. Котельные установки ТЭС
20. Качественный анализ смены режимов течения и теплообмена по длине парогенерирующего канала
21. Общая характеристика рекуперативных поверхностных и смешительных теплообменников; принципиальная схема регенеративных теплообменников
22. Характеристика наиболее распространенных теплоносителей, используемых в теплообменниках. Влияние отложений (загрязнений) на теплопередачу, способы снижения отрицательного влияния загрязнений
23. Тепловой баланс и средний температурный напор в идеальном прямоточном и противоточном теплообменниках
24. Изменение среднемассовых температур теплоносителей по длине прямоточного и противоточного теплообменников в зависимости от соотношения водяных эквивалентов
25. Число единиц переноса и эффективность теплообменников. Вывод формул для эффективности прямоточного и противоточного теплообменников; зависимости эффективности от числа единиц переноса и соотношения водяных эквивалентов теплоносителей
26. Средний температурный напор для перекрестного и смешанного течения теплоносителей в теплообменниках
27. Методика расчета теплопередачи в кожухотрубчатых теплообменниках с поперечными перегородками
28. Расчет теплопередачи через оребренную стенку (эффективность простых по геометрии ребер, эффективность оребренной поверхности, коэффициент теплопередачи)
29. Расходные и истинные паросодержания двухфазных потоков; истинные и приведенные скорости фаз, скорость смеси и скорость циркуляции; однородная (расходная) и истинная плотности смеси
30. Структура (режимы течения) двухфазных потоков в вертикальных и горизонтальных каналах; определение (расчет) границ режимов течения
31. Влияние профилей скорости и истинного объемного паросодержания на эффективное скольжение фаз в двухфазных потоках
32. Связь истинного и расходного объемных паросодержаний в потоках с локальным скольжением фаз (модели Д.А. Лабунцова и Зубера-Финдлея)
33. Одномерные уравнения сохранения импульса и энергии в двухфазных потоках квазигомогенной структуры
34. Гомогенная модель для расчета сопротивления трения в двухфазном потоке; уточнение модели с учетом фактического скольжения фаз
35. Моделирование кольцевого двухфазного потока

36. Теплообмен при развитом пузырьковом кипении в условиях свободного движения жидкости (в большом объеме)
37. В воздушном теплообменнике охлаждается трансформаторное масло от температуры  $T_{гвх}$  до  $T_{гвых}$ . Воздух при этом нагревается с  $T_{хвх}$  до  $T_{хвых}$ . Охладитель представляет собой  $n$  ряда горизонтальных труб (по  $N$  труб в каждом ряду) из стали внутренним диаметром  $d$  толщиной стенки  $\delta$ , длиной  $L$ . Внутри труб движется масло. На наружной поверхности труб для интенсификации теплоотдачи установлены круглые алюминиевые ребра диаметра  $D$  и толщиной  $\delta_r$ . Трубы расположены по углам равносторонних треугольников, с шагом  $S$ . Организовано  $k$  хода по течению горячего теплоносителя. Воздух подается снизу вверх с помощью нагнетающего вентилятора. Известны коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_g$ ,  $\alpha_x$ . Рассчитать теплопроизводительность аппарата.
38. Рассчитать паропроизводительность и потери давления экспериментального парогенератора. Парогенератор представляет собой одноходовой кожухотрубчатый теплообменник. Греющая среда – пароводяная смесь  $G_g$ ,  $P_g$ , паросодержанием на входе  $X_{вх}$  движется по горизонтальным трубам из титана диаметром  $d$ , толщиной стенки  $\delta$ , длиной  $L$ ; число трубок –  $N$ . В межтрубном пространстве кипит насыщенная вода при давлении  $P_x$ . Экспериментально определено, что паросодержание на выходе из греющей секции равно  $X_{вых}$
39. Определить рабочую длину трубок кожухотрубчатого теплообменника, работающего на охлаждение турбинного масла от температуры  $T_{гвх}$  до  $T_{гвых}$ . Аппарат двухходовой по охлаждающей воде  $G_x$ , температура на входе  $T_{хвх}$  (используются U-образные трубки в количестве  $N$  штук, диаметром  $d$ , толщиной стенки  $\delta$ ), масло движется в межтрубном пространстве  $G_g$ . Принять коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве  $\alpha_g$ . Учесть термическое сопротивление загрязнений.
40. Рассчитать теплопроизводительность и температуры теплоносителей на выходе из противоточного теплообменника типа «труба в трубе», рассчитанного на охлаждение дистиллированной воды с входной температурой  $T_{гвх}$  (давлением  $P$ ) водопроводной водой с входной температурой  $T_{хвх}$ . Теплообменник состоит из  $N$  секций (последовательно соединенных) стальных труб длиной  $L$  м, внутренняя труба  $d$ , диаметр кожуховой трубы  $D$ . Известны расходы теплоносителей  $G_x$ ,  $G_g$ , коэффициенты теплоотдачи в каждой секции  $\alpha_g$ ,  $\alpha_x$ . Учесть загрязнение стенки со стороны водопроводной воды  $R_3$ .
41. Рассчитать движущий напор, потери давления на трение и на ускорение в греющей секции экспериментального контура естественной циркуляции, если измеренное значение скорости воды на входе в обогреваемую трубу  $w_0$ . Высота секции  $H$ , внутренний диаметр трубы  $d_v$ , плотность теплового потока на стенке  $q$ , давление на выходе из обогреваемой трубы  $p$ . На вход в обогреваемую трубу вода поступает при температуре насыщения, отвечающей давлению на выходе. В опускном канале обеспечивается течение однофазной воды (нулевое паросодержание). Принять, что закипание начинается на входе в обогреваемую трубу (длина экономайзерного участка  $z_{зк}=0$ ).
42. Выполнить поверочный расчет (определить температуру питательной воды на выходе,  $T_{x2}$  и расход греющего пара  $G_g$ ) регенеративного подогревателя питательной воды, представляющего собой вертикальный кожухотрубчатый теплообменник. Питательная вода высокого давления с температурой  $T_{x1}$ , с расходом  $G_x$  поступает в нижнюю камеру и нагревается, проходя по трубам из стали 12X18H9T диаметром  $d_n/d_v$ , высотой  $H$ . На наружной поверхности труб конденсируется насыщенный водяной пар под давлением  $p_{гр}$ . Число труб –  $N$ .
- Указания:
- 1). В расчетах пренебречь участками труб, приходящимися на трубные доски и на слой конденсата в нижней части корпуса;
  - 2). Термическое сопротивление отложений принять  $R_3$ .



- 3). В первом приближении принять, что средний температурный напор со стороны конденсирующегося пара  $\Delta T_{\text{кон}} = T_S - T_{\text{сг}}$ ;
- 4). Пренебречь изменением свойств питательной воды по длине трубы и с давлением, а также изменением свойств по толщине конденсатной пленки.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Какая схема организации движения теплоносителя является наиболее эффективной с точки зрения использования доступного перепада температур?

Ответы:

1. Прямоточная
2. Противоточная
3. Смешанная

Верный ответ: 2. Противоточная

2. Коэффициент теплоотдачи со стороны одного из теплоносителей равняется  $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Может ли коэффициент теплопередачи равняться  $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ?

Ответы:

1. Да
2. Нет

Верный ответ: 2. Нет

3. Коэффициент теплоотдачи со стороны холодного теплоносителя равняется  $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ , со стороны горячего -  $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Со стороны какого теплоносителя эффективны мероприятия по интенсификации теплообмена?

Ответы:

1. Со стороны холодного теплоносителя
2. Со стороны горячего теплоносителя

Верный ответ: 1. Со стороны холодного теплоносителя

4. Имеется противоточный теплообменник "труба-в-трубе". Оба теплоносителя имеют одинаковые водяные эквиваленты. Температура одного из теплоносителей на входе  $20 \text{ С}$ , выходе -  $40 \text{ С}$ . Для второго теплоносителя  $60 \text{ С}$  и  $40 \text{ С}$ , соответственно. Чему равняется среднелогарифмический перепад температур?

Ответы:

1.  $20 \text{ С}$
2.  $40 \text{ С}$
3.  $10 \text{ С}$

Верный ответ: 1.  $20 \text{ С}$

5. Имеется труба с диаметром  $15 \text{ мм}$ , на поверхности установлены цилиндрические ребра с диаметром  $25 \text{ мм}$ . Толщина ребер -  $2 \text{ мм}$ , расстояние между ребрами  $3 \text{ мм}$ . Чему равняется коэффициент оребрения (отношение площади оребренной поверхности к площади трубки без ребер)?

Ответы:

1. 3.9
2. 2.1
3. 10.1

Верный ответ: 1. 3.9

6. В кожухотрубчатом теплообменном аппарате вода с водяным эквивалентом  $4200 \text{ Вт/К}$  нагревается от  $20 \text{ С}$ . При этом второй теплоноситель (воздух) с водяным эквивалентом  $2000 \text{ Вт/К}$  охлаждается от  $80 \text{ С}$ . Какая максимально возможная теплопроизводительность аппарата?

Ответы:

1.  $120 \text{ кВт}$
2.  $252 \text{ кВт}$
3. Представленных данных не достаточно.

Верный ответ: 1. 120 кВт

7. Отношение плотностей жидкой и паровой фазы при некоторых условиях равно 10. На вход в обогреваемый канал поступает теплоноситель в жидком состоянии со скоростью 1 м/с. На выходе расходное массовое паросодержание равно 1. Чему равняется скорость потока?

Ответы:

- 1 м/с
- 10 м/с
- 100 м/с

Верный ответ: 2. 10 м/с

8. Двигается пароводяной поток. Расход пара - 2 кг/с, расход воды - 4 кг/с. Чему равно расходное массовое паросодержание?

Ответы:

- $\frac{1}{3}$
- $\frac{2}{3}$
- $\frac{1}{2}$

Верный ответ: 1.  $\frac{1}{3}$

9. В теплообменных аппаратах с конденсацией происходящей при давлении существенно ниже атмосферного могут накапливаться неконденсирующиеся примеси. Как сказывается их наличие на процессе конденсации?

Ответы:

- Интенсивность конденсации снижается
- Интенсивность конденсации практически не изменяется

Верный ответ: 1. Интенсивность конденсации снижается

10. При движении тонких пленок жидкости в теплообменных аппаратах на их поверхности часто образуются волны. Как наличие волн сказывается на коэффициенте теплоотдачи, если средняя толщина пленки при наличии волн и при их отсутствии не изменяется?

Ответы:

- Коэффициент теплоотдачи увеличивается.
- Коэффициент теплоотдачи уменьшается.
- Коэффициент теплоотдачи не изменяется.

Верный ответ: 1. Коэффициент теплоотдачи увеличивается.

11. Для расчета часто используется такой параметр, как число единиц переноса равный отношению произведения коэффициента теплопередачи на площадь теплообменной поверхности к минимальному водяному эквиваленту. Допустим есть два теплообменника для которых число единиц переноса равно 0,2 (первый) и 1,0 (второй). Какой из них более эффективен по теплоносителю с минимальным водяным эквивалентом?

Ответы:

- Первый ( $NTU = 0,2$ )
- Второй ( $NTU = 1,0$ )

Верный ответ: 2. Второй ( $NTU = 1,0$ )

12. Балансное паросодержание равно  $x_0^b = -0,2$ . Может ли при этом расходное массовое паросодержание быть отличным от нуля?

Ответы:

- Да
- Нет.

Верный ответ: 1. Да

13. Для предотвращения образования слоя загрязнений на теплообменной поверхности рекомендуется увеличивать или уменьшать скорость движения теплоносителя?

Ответы:

1. Увеличивать.
2. Уменьшать.

Верный ответ: 1. Увеличивать.

14. При турбулентном течении воды в круглой трубе фиксированного размера увеличение скорости движения приводит к более быстрому росту коэффициента теплоотдачи или мощности, затрачиваемой на прокачку теплоносителя?

Ответы:

1. Быстрее растет мощность на прокачку теплоносителя
2. Быстрее растет коэффициент теплоотдачи

Верный ответ: 1. Быстрее растет мощность на прокачку теплоносителя

15. Есть рекуперативный теплообменник с фазовым переходом одного из теплоносителей. Какая схема организации движения теплоносителей обеспечивает более высокую среднелогарифмическую разность температур?

Ответы:

1. Прямоточная
2. Противоточная
3. Между прямоточной и противоточной схемой разницы нет

Верный ответ: 3. Между прямоточной и противоточной схемой разницы нет

## ***II. Описание шкалы оценивания***

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня

## ***III. Правила выставления итоговой оценки по курсу***

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