

**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

**Оценочные материалы
по дисциплине
Тепломассообмен**

**Москва
2024**

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Минко М.В.
	Идентификатор	Rd8d5bd57-MinkoMV-7341f784

М.В. Минко

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

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-1 Способен проводить расчеты теплофизических характеристик процессов, протекающих в конкретных технических устройствах и аппаратах энергетического оборудования

ИД-1 Владеет навыками расчета процессов гидродинамики и теплообмена в энергетическом оборудовании

и включает:

для текущего контроля успеваемости:

Форма реализации: Письменная работа

1. Тепловой расчет теплообменных аппаратов (Контрольная работа)
2. Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины. Расчет среднemasсовой температуры при течении жидкости в трубах (Контрольная работа)
3. Теплообмен при кипении (Контрольная работа)
4. Теплообмен при конденсации пара (Контрольная работа)
5. Теплообмен при свободной конвекции (Контрольная работа)
6. Теплообмен при течении в трубах. Теплообмен при поперечном обтекании труб и трубных пучков (Контрольная работа)

Форма реализации: Смешанная форма

1. Влияние переменности свойств теплоносителя и свободной конвекции на теплообмен. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена. Модели и математическое описание двухфазных систем (Коллоквиум)
2. Коэффициент теплоотдачи; математическое описание ТМО; методы подобия (Коллоквиум)
3. Теплообмен в погранслое; свободная конвекция. Теплообмен в каналах (Коллоквиум)
4. Теплообмен при конденсации. Физические закономерности кипения и расчет теплообмена (Коллоквиум)

БРС дисциплины

7 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %					
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
	Срок КМ:	4	8	12	15	16
Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений						

Коэффициент теплоотдачи. Классификация процессов конвективного теплообмена. Качественное обоснование расчетных уравнений	+	+	+	+	
Математическое описание процессов конвективного теплообмена					
Математическое описание процессов конвективного теплообмена	+	+	+	+	
Применение теории подобия к анализу теплообмена					
Применение теории подобия к анализу теплообмена		+			
Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой. Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения					
Теплообмен при внешнем обтекании тела. Ламинарный пограничный слой	+		+	+	+
Переход к турбулентному течению. Осредненные уравнения	+		+	+	+
Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи. Теплообмен при обтекании пучков труб					
Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Аналогия Рейнольдса. Расчетные соотношения для теплоотдачи	+		+	+	+
Теплообмен при обтекании пучков труб	+		+	+	+
Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах					
Теплообмен при свободной конвекции в пограничном слое и в замкнутых объемах	+		+	+	+
Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении					
Математическое описание теплообмена в круглых трубах. Интеграл Лайона. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении	+		+	+	+
Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном участке круглой трубы. Начальный участок при турбулентном течении.					
Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном участке круглой трубы. Начальный участок при турбулентном течении					+
Вес КМ:	15	20	15	15	35

8 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %					
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
	Срок КМ:	3	7	10	13	14
Влияние переменности свойств теплоносителя. Влияние свободной конвекции. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена						

Влияние переменности свойств теплоносителя. Влияние свободной конвекции	+	+			
Теплообмен при СКД	+	+			
Интенсификация конвективного теплообмена	+				
Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель					
Модели двухфазных сред. Условия совместности; неравновесные эффекты. Количественные характеристики двухфазных потоков. Гомогенная модель		+			
Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации					
Теплообмен при конденсации на вертикальной плоскости и поверхности горизонтальной трубы. Конденсация в трубах. Методы интенсификации			+		+
Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия отрыва от стенки					
Физика кипения: зарождение паровой фазы, рост паровых пузырьков, условия отрыва от стенки					+
Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения					
Теплообмен при кипении. Пленочное и переходное кипение. Механизм и расчет теплообмена при пузырьковом кипении. Кипение в потоке. Кризисы кипения				+	+
Вес КМ:	15	25	15	15	30

\$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-1	ИД-1ПК-1 Владеет навыками расчета процессов гидродинамики и теплообмена в энергетическом оборудовании	Знать: закономерности процессов вынужденной однофазной конвекции при изменяющихся теплофизических свойствах жидкости закономерности процессов свободной и вынужденной однофазной конвекции математическое описание и модели двухфазных сред методы теории подобия для обобщения результатов опытного исследования теплообмена закономерности теплообмена при конденсации и кипении математическое описание процессов тепло- и массообмена Уметь: рассчитывать допустимые уровни тепловых потоков	Теплообмен при течении в трубах. Теплообмен при поперечном обтекании труб и трубных пучков (Контрольная работа) Теплообмен при свободной конвекции (Контрольная работа) Теплообмен при конденсации пара (Контрольная работа) Теплообмен при кипении (Контрольная работа) Влияние переменной свойств теплоносителя и свободной конвекции на теплообмен. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена. Модели и математическое описание двухфазных систем (Коллоквиум) Теплообмен при конденсации. Физические закономерности кипения и расчет теплообмена (Коллоквиум) Тепловой расчет теплообменных аппаратов (Контрольная работа) Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины. Расчет среднemasсовой температуры при течении жидкости в трубах (Контрольная работа) Теплообмен в погранслое; свободная конвекция. Теплообмен в каналах (Коллоквиум) Коэффициент теплоотдачи; математическое описание ТМО; методы подобия (Коллоквиум)

		при кипении жидкости работать с данными о теплофизических свойствах веществ, необходимых в расчетах теплообмена проводить тепловой расчет теплообменных аппаратов рассчитывать интенсивность теплообмена при конденсации выбирать методику и осуществлять расчет температурного режима тепловыделяющих объектов	
--	--	---	--

II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

7 семестр

КМ-1. Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины. Расчет среднemasсовой температуры при течении жидкости в трубах

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 15

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа проводится в аудитории. Время выполнения - 1,5 часа. Студент должен решить 3 задачи по темам "Теплообмен при вынужденном обтекании плоской пластины. Расчет среднemasсовой температуры при течении жидкости в трубах"

Краткое содержание задания:

Выбрать методику и осуществить расчет теплообмена при продольном ламинарном и турбулентном обтекании пластины. Составить уравнение теплового баланса. Определить среднemasсовую температуру в канале в различных сечениях.

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: выбирать методику и осуществлять расчет температурного режима тепловыделяющих объектов	1. Тонкая константановая лента сечением 0,1 мм на 5 мм нагревается электрическим током силой $I=20$ А. Электрическое сопротивление 1 м ленты составляет 1,0 Ом. Лента обтекается продольным потоком воды. Скорость и температура набегающего потока составляют соответственно 0,5 м/с и 10 °С. Определить температуру поверхности ленты на расстояниях 1,5 м от передней кромки. 2. По каналу тепловыделяющего элемента ядерного реактора движется вода под давлением $p = 8$ МПа. Диаметр канала $d = 8$ мм и его длина $l = 2,5$ м. Расход воды $G = 0,12$ кг/с. Температура воды на входе в канал 190 °С. Определить температуры воды на выходе, если приблизительно принять плотность теплового потока постоянной по длине канала и равной $q_c = 620$ кВт/м². Учесть зависимость теплоемкости воды от температуры.
---	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-2. Коэффициент теплоотдачи; математическое описание ТМО; методы подобия

Формы реализации: Смешанная форма

Тип контрольного мероприятия: Коллоквиум

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Подготовка к коллоквиуму проводится студентом самостоятельно вне аудитории. Должен быть подготовлен письменный ответ на вопросы коллоквиума в соответствии с вариантом. Защита коллоквиума проводится устно в аудитории во время занятия.

Краткое содержание задания:

Необходимо ответить на вопросы по темам “Коэффициент теплоотдачи; математическое описание ТМО; методы подобия”.

Опишите содержание и классификацию задач конвективного теплообмена. В чем связь молекулярного и конвективного переноса тепла в движущейся жидкости? Дайте определение коэффициента теплоотдачи, числа Нуссельта. Опишите качественные закономерности и расчетные формулы для теплообмена при обтекании плоской пластины и для течения в круглых трубах.

Запишите общую форму уравнений сохранения при эйлеровом методе описания.

Запишите уравнение сохранения массы (неразрывности); уравнение сохранения импульса; уравнение сохранения энергии в движущейся среде; уравнение сохранения массы компонента в бинарной смеси. Опишите влияние диффузионного потока массы компонента на перенос импульса и энергии в бинарной смеси. В чем состоит аналогия процессов переноса импульса, энергии и массы компонента в смеси?

Дайте определение подобия физических явлений. Сформулируйте теоремы теории подобия. Опишите физический смысл чисел подобия в механике однофазных и двухфазных систем, в процессах конвективного тепло- и массообмена. Сформулируйте основные положения теории размерностей.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: математическое описание процессов тепло- и массообмена	1.1. Чем отличаются внешние и внутренние задачи конвективного теплообмена? 2. Перечислите признаки, по которым строится классификация процессов конвективного теплообмена. 3. Как связаны молекулярный и конвективный потоки энергии в случае стабилизированного теплообмена в канале? 4. Что такое толщина эквивалентной пленки? В какой мере эта величина определяет физический смысл коэффициента теплоотдачи (КТО)? 5. Как зависит толщина пограничного слоя от кинематической вязкости жидкости? Какой коэффициент переноса играет аналогичную роль в процессах теплообмена? 6. Как и почему изменяется КТО по длине пластины при
---	--

	ламинарном и турбулентном режимах течения в пограничном слое? 7. Какое содержание имеет уравнение теплового баланса для теплообмена в канале? 8. Какие числа подобия используются для описания теплообмена в начальном участке круглой трубы при ламинарном течении?				
Знать: методы теории подобия для обобщения результатов опытного исследования теплообмена	1. Заполните таблицу:				
		Число подобия	Обозначение	Соотношение	Запись через отношение сил/тепловых потоков/потоков масс компонентов различной физической природы
	1	Число Рейнольдса			
	2	Число Фруда			
	3	Число Вебера			
	4	Число Архимеда			
	5	Число Эккерта			
	6	Число Стантона			
	7	Число Рэлея			
	8	Число Пекле (диффузионное)			
	9	Число Шервуда			

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-3. Теплообмен при течении в трубах. Теплообмен при поперечном обтекании труб и трубных пучков

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 15

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа проводится в аудитории. Время выполнения - 1,5 часа. Студент должен решить 3 задачи по темам "Теплообмен при течении в трубах. Теплообмен при поперечном обтекании труб и трубных пучков"

Краткое содержание задания:

Выбрать методику и осуществить расчет теплообмена при вынужденном течении жидкости в трубе. Выбрать методику и осуществить расчет теплообмена при внешнем поперечном обтекании труб и трубных пучков.

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: выбирать методику и осуществлять расчет температурного режима тепловыделяющих объектов	1. Стальная труба (258×4мм, Ст. 20, $\lambda = 40 \text{ Вт/(м·К)}$) теплотрассы горячего водоснабжения длиной 50 м проложена через железнодорожные пути под эстакадой на открытом воздухе ($t_{\text{в}} = 0 \text{ °C}$). На входе в этот участок теплотрассы температура воды равна 100 °C и скорость ее движения $0,05 \text{ м/с}$. Коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности трубы составляет при этом $20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Вычислить температуру воды в конце указанного участка теплотрассы, а также средние по длине температуры воды и стенки трубы. 2. Экономайзер котельной установки изготовлен из стальных гладких труб диаметром $d_2/d_1 = 37/30 \text{ мм}$, расположенных в шахматном порядке с относительным поперечным и продольным шагом $s_1/d = 2,0$, $s_2/d = 1,5$. Число поперечных рядов труб по ходу газа $z = 6$. Температура дымовых газов на входе в экономайзер равна $T_{\text{ж1}} = 600 \text{ C}$, выходе из него $T_{\text{ж2}} = 400 \text{ C}$, а скорость в узком сечении пучка $w = 12 \text{ м/с}$. Найти общую длину труб, если известно, что тепловой поток, передаваемый воде, протекающей внутри труб, $Q = 32 \cdot 10^3 \text{ Вт}$, а температура наружной стенки трубы $T_{\text{с}} = 230 \text{ C}$.
--	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-4. Теплообмен при свободной конвекции

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 15

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа проводится в аудитории. Время выполнения - 1,5 часа. Студент должен решить 3 задачи по темам "Теплообмен при свободной конвекции"

Краткое содержание задания:

Выбрать методику и осуществить расчет теплообмена при свободной конвекции.

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: выбирать методику и осуществлять расчет температурного режима тепловыделяющих объектов	1. Кирпичи вынимают из печи для обжига при температуре 420°C и охлаждают в покоем воздухе при температуре 30°C. Высота кирпича 10 см, а размеры его основания 14×7 см. Рассчитать тепловой поток от кирпича в результате естественной конвекции сразу после извлечения из печи. Кирпичи лежат на теплоизолированной поверхности. 2. Паровая труба проходит вертикально через помещение. Температура наружной поверхности трубы 60°C, а температура неподвижного воздуха в помещении 20°C. Наружный диаметр трубы 68 мм, а длина ее участка в помещении 3,4 м. Определить тепловой поток от трубы в условиях свободной конвекции. Предполагая, что стены помещения полностью теплоизолированы, а его объем составляет 900 м^3, рассчитать, за какое время температура воздуха в помещении повысится на 1°C. 3. Оконная рама с двойным остеклением состоит из двух стекол толщиной 0,5 см каждое, разделенных слоем воздуха толщиной 5 см. Определить тепловой поток через раму, когда температура наружной поверхности внешнего стекла рамы равна -10°C, а температура внутренней поверхности другого стекла 20°C.
---	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-5. Теплообмен в пограничном слое; свободная конвекция. Теплообмен в каналах

Формы реализации: Смешанная форма

Тип контрольного мероприятия: Коллоквиум

Вес контрольного мероприятия в БРС: 35

Процедура проведения контрольного мероприятия: Подготовка к коллоквиуму проводится студентом самостоятельно вне аудитории. Должен быть подготовлен письменный ответ на вопросы коллоквиума в соответствии с вариантом. Защита коллоквиума проводится устно в аудитории во время занятия.

Краткое содержание задания:

Необходимо ответить на вопросы по темам “Теплообмен в пограничном слое; свободная конвекция”.

Запишите систему уравнений температурного пограничного слоя. Проведите анализ теплообмена при ламинарном течении в пограничном слое методами размерностей. Выведите соотношения для описания теплообмена при ламинарном обтекании изотермической пластины. Проведите анализ предельных по числу Прандтля случаев.

Как осуществляется переход к турбулентному режиму течения в пограничном слое и в каналах? В чем состоят основные результаты теоретического анализа устойчивости? Какие факторы, влияющие на переход к турбулентному течению, Вы знаете? Запишите осредненные уравнения движения и энергии для турбулентного течения. Что такое кажущиеся напряжения турбулентного трения, турбулентный тепловой поток? Опишите структуру пристенной турбулентной области.

В чем состоит механизм турбулентного переноса импульса? Какие методы его моделирования Вы знаете? В чем состоит аналогия Рейнольдса для теплообмена при турбулентном течении в пограничном слое. В чем состоит ее модернизированный вариант (двухслойная схема)? Приведите расчетные соотношения для теплоотдачи. Опишите теплообмен при поперечном обтекании одиночного цилиндра и пучков труб. Приведите математическое описание свободной конвекции. В чем состоит приближение Буссинеска? Чему равняется максимальная скорость свободной конвекции? Что такое свободноконвективный пограничный слой на вертикальной плоскости? Как рассчитать коэффициента теплоотдачи при ламинарном и турбулентном течении? Опишите свободную конвекцию у поверхности горизонтального цилиндра и сферы. Опишите свободную конвекцию на горизонтальной плоскости, в прослойках и в замкнутых объемах.

Необходимо ответить на вопросы по теме “Теплообмен в каналах”.

Запишите математическое описание теплообмена в круглых трубах. Запишите уравнение теплового баланса, дайте определения среднemasсовой скорости и температуры. В чем проявляются особенности стабилизированного теплообмена при граничных условиях 2-го рода? Выведите уравнения для профилей скорости, температуры, теплового потока при ламинарном и турбулентном течении. Выведите интеграл Лайона. Выведите уравнения, описывающие стабилизированный теплообмен при ламинарном течении. Выведите уравнения, описывающие стабилизированный теплообмен при турбулентном течении. В чем состоят результаты теоретического анализа для неметаллических жидкостей и жидких металлов? Приведите расчетные формулы.

Выведите уравнения, описывающие теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном термическом участке круглой трубы. Опишите основные закономерности

теплообмена на начальном гидродинамическом участке и на начальном участке при турбулентном течении.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: закономерности процессов свободной и вынужденной однофазной конвекции	1.1. Система уравнений динамического пограничного слоя (положения теории Прандтля, результаты приложения к двумерной г/д задаче). 2. Основное содержание и результаты задачи Блазиуса (автомодельность, методика анализа, профиль скорости, скорость течения при малых η, физический смысл величины $f''(0)$). 3. Турбулентный переход как результат потери устойчивости ламинарного течения (постановка задачи, качественный анализ нейтральной кривой). 4. Цель получения и вывод осредненных уравнений турбулентного движения и теплообмена. 5. Методы определения турбулентной вязкости и турбулентной температуропроводности на основе экспериментальных измерений. 6. Структура пристеночной турбулентной области, обоснование логарифмического профиля температуры. 7. Классическая аналогия Рейнольдса. 8. Гидродинамика при поперечном обтекании одиночного цилиндра при различных числах Рейнольдса. 9. Сравнение коридорных и шахматных пучков труб по закономерностям гидродинамики и теплоотдачи; изменение КТО по глубине пучков. 10. Обоснование приближения Буссинеска для теплоотдачи при свободной конвекции. 11. Приближенное решение задачи о теплообмене при ламинарной свободной конвекции у вертикальной плоскости, расчетные формулы. 12. Свободная конвекция у поверхности сферы. Минимальное число Нуссельта. 2.1. Допущения, обычно используемые при формулировке математического описания теплообмена в круглой трубе. К каким упрощениям приводит приближение длинной трубы? 2. Теплопередача через стенку трубы; зависимость вида граничных условий для теплоотдачи в трубах от соотношения энтальпий массового расхода (водяных эквивалентов) теплоносителей в теплообменниках. 3. Стабилизированный теплообмен при ламинарном течении жидкости в круглой трубе при $q_c = \text{Const}$: профили теплового потока и температуры, КТО. 4. Качественный анализ профилей температуры при стабилизированном теплообмене в условиях турбулентного течения в круглой трубе (влияние Re и Pr). 5. Анализ результатов расчета стабилизированного
---	--

	теплообмена при турбулентном течении в трубе; теплоотдача при турбулентном течении жидких металлов. 6. Теплоотдача в начальном термическом участке круглой трубы при ламинарном течении и $q_c = \text{Const}$. 7. Теплообмен в начальном гидродинамическом участке круглой трубы при ламинарном течении: общие положения, соотношения длин начального термического и гидродинамического участков, случай Pr порядка 1. 8. Теплообмен в начальном гидродинамическом участке круглой трубы при турбулентном течении в условиях плавного входа.
--	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

8 семестр

КМ-1. Тепловой расчет теплообменных аппаратов

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 15

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа проводится в аудитории. Время выполнения - 1,5 часа. Студент должен решить 3 задачи по теме "Тепловой расчет теплообменных аппаратов".

Краткое содержание задания:

Выбрать методику и осуществить тепловой расчет теплообменных аппаратов.

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: проводить тепловой расчет теплообменных аппаратов	1.Трубчатый теплообменник состоит из 410 труб диаметром 20 мм и имеет поверхность теплообмена 48 м ² . В нем нагреваются 85,5 т/ч воды от 77 до 95 °С. Греем средой является насыщенный водяной пар при избыточном давлении 0,43·10 ⁵ Па. Найти
--	---

	коэффициент теплоотдачи к пару. Теплообмен в трубах считать стабилизированным, термическим сопротивлением стенки пренебречь. 2. Найти площадь поверхности теплообмена испарителя, производительность которого по вторичному пару 2,4 кг/с. Давление вторичного пара 0,5 МПа. Температура воды на входе в испаритель равна температуре насыщения. Греем средой является сухой насыщенный пар при давлении 0,7 МПа. Конденсат греющего пара в испарителе не переохлаждается. Коэффициент теплопередачи равен 1800 Вт/(м²*К).
Уметь: работать с данными о теплофизических свойствах веществ, необходимых в расчетах теплообмена	1. В вертикальном канале диаметром 4,57 мм исследовался теплообмен при течении азота СКД (p=3,5 МПа). Эксперименты были проведены при массовых скоростях 28,1 и 42 кг/(м²*с) и плотности теплового потока на стенке 6800 Вт/м². Определите зависимость коэффициента теплоотдачи от среднemasсовой энтальпии жидкости в диапазоне от - 25 кДж/кг до 125 кДж/кг.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-2. Влияние переменности свойств теплоносителя и свободной конвекции на теплообмен. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена. Модели и математическое описание двухфазных систем

Формы реализации: Смешанная форма

Тип контрольного мероприятия: Коллоквиум

Вес контрольного мероприятия в БРС: 25

Процедура проведения контрольного мероприятия: Подготовка к коллоквиуму проводится студентом самостоятельно вне аудитории. Должен быть подготовлен письменный ответ на вопросы коллоквиума в соответствии с вариантом. Защита коллоквиума проводится устно в аудитории во время занятия.

Краткое содержание задания:

Необходимо ответить на вопросы по темам “Влияние переменности свойств теплоносителя и свободной конвекции на теплообмен. Теплообмен при СКД. Интенсификация конвективного теплообмена”.

В чем состоит влияние переменности свойств жидкости на теплообмен при течении в трубах капельных жидкостей и газов? В чем состоит влияние свободной конвекции на теплообмен при вынужденном течении жидкостей в трубах различной ориентации?

Опишите основные закономерности теплообмена в однофазной сверхкритической области. Какие методы интенсификации процессов однофазного конвективного теплообмена Вы знаете?

Необходимо ответить на вопросы по теме “Модели и математическое описание двухфазных систем”.

Приведите математическое описание и модели двухфазных сред. Запишите универсальные условия совместности на межфазных границах: вывод в общей форме, запись для потоков массы, импульса, энергии и массы компонента в смеси. Как получить уравнение для скорости границы раздела фаз? Запишите универсальные условия совместности в системе отсчета наблюдателя. Запишите специальные условия совместности для процессов тепломассообмена. В чем состоит неравновесность на межфазных границах? В чем суть квазиравновесного приближения? Приведите количественные характеристики двухфазных потоков. Опишите гомогенную модель.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: закономерности процессов вынужденной однофазной конвекции при изменяющихся теплофизических свойствах жидкости	1.1. Как изменяется математическое описание теплообмена в трубе при переменных теплофизических свойствах жидкости? 2. Почему влияние переменности свойств газов на теплообмен и трение учитывается с помощью «температурного фактора»? 3. Как влияет на теплообмен при ламинарном течении в вертикальной трубе сонаправленная свободная конвекция? 4. Почему при турбулентном течении в вертикальном канале при небольших числах Рейнольдса влияние свободной конвекции качественно противоположно тому, что наблюдается при ламинарном вынужденном течении? 5. Как изменяется изобарная теплоемкость жидкости и пара при приближении к критической точке? Изменение теплоемкости c_p при СКД. 6. Как определяются области «псевдожидкости», «псевдогаза» и «псевдофазового перехода» для вещества при СКД? Закономерности теплообмена в этих областях. 7. Почему повышение скорости течения теплоносителей не рассматривается обычно как способ интенсификации теплоотдачи? 8. Какие типы и характерные масштабы микроструктурированных поверхностей используются для интенсификации теплоотдачи в капельных жидкостях?
Знать: математическое описание и модели двухфазных сред	1.1. Из чего состоит математическое описание газо-жидкостных систем?

	2. Для каких парожидкостных систем подходит модель раздельного течения и в чем ее основные положения? 3. Универсальные условия совместности – вывод в общей форме. 4. Универсальные условия совместности для частных задач: условия Рэнкина–Гюгонио; фазовые переходы умеренной интенсивности; непроницаемая поверхность. 5. Почему скорость границы раздела фаз требует специального определения? Как она выражается, если уравнение границы задано аналитически? 6. Каким образом качественный анализ поведения функции распределения молекул в газе у межфазной границы позволяет объяснить возникновение неравновесных эффектов? 7. Какого вида неравновесность существует при обтекании газом твердой поверхности? При каких условиях она существенна? 8. Как соотносятся массовое и объемное расходные паросодержания при низких приведенных давлениях? В каких случаях массовое расходное паросодержание и относительная энтальпия потока – одна и та же величина?
--	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-3. Теплообмен при конденсации пара

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 15

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа проводится в аудитории. Время выполнения - 1,5 часа. Студент должен решить 3 задачи по теме "Теплообмен при конденсации пара".

Краткое содержание задания:

Выбрать методику и осуществить тепловой расчет теплообмена при конденсации.

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: рассчитывать интенсивность теплообмена при конденсации	1. Определить коэффициент теплоотдачи при конденсации сухого насыщенного водяного пара атмосферного давления на наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром 16 мм и длиной 1 м при температуре стенки 80 °С. Определить среднюю по периметру толщину пленки, а также тепловой поток и расход конденсата. 2. Найти среднюю температуру стенки вертикально расположенной трубы, в которой происходит конденсация при давлении 1,55 МПа, если известно, что $x_{вх} = 0,8$, $x_{вых} = 0,4$, $d = 16$ мм, $l = 2,5$ м, средняя плотность теплового потока 1,3 МВт/м².
---	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-4. Теплообмен при кипении

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 15

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа проводится в аудитории. Время выполнения - 1,5 часа. Студент должен решить 3 задачи по теме "Теплообмен при кипении".

Краткое содержание задания:

Выбрать методику и осуществить тепловой расчет теплообмена при кипении.

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: рассчитывать допустимые уровни тепловых потоков при кипении жидкости	1. В сосуде кипит вода под давлением $p = 0,2$ МПа. Режим кипения пузырьковый. Чему равна плотность теплового потока на поверхности нагрева, если температура стенки сосуда $T_c = 135$ °С? Определить
---	---

	коэффициент теплоотдачи при кипении. 2. На наружной поверхности трубы кипит вода под давлением 3,3 МПа. Плотность теплового потока на поверхности трубы составляет 175 кВт/м². Определить температуру поверхности трубы: а) если поверхность чистая; б) если поверхность трубы покрыта оксидной пленкой, термическое сопротивление которой $7,75 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$. При расчете принять, что за счет шероховатости оксидной пленки коэффициент теплоотдачи возрастает в 2,5 раза по сравнению с кипением на чистой поверхности.
--	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-5. Теплообмен при конденсации. Физические закономерности кипения и расчет теплообмена

Формы реализации: Смешанная форма

Тип контрольного мероприятия: Коллоквиум

Вес контрольного мероприятия в БРС: 30

Процедура проведения контрольного мероприятия: Подготовка к коллоквиуму проводится студентом самостоятельно вне аудитории. Должен быть подготовлен письменный ответ на вопросы коллоквиума в соответствии с вариантом. Защита коллоквиума проводится устно в аудитории во время занятия.

Краткое содержание задания:

Необходимо ответить на вопросы по теме “Теплообмен при конденсации”.

В чем состоят различия пленочной и капельной конденсации? Опишите теплообмен при пленочной конденсации на вертикальной плоскости (задача Нуссельта). Запишите соотношения для теплообмена при конденсации на поверхности горизонтального цилиндра. Проведите анализ основных допущений в задаче Нуссельта. Приведите расчетные формулы. Опишите теплообмен при конденсации в условиях турбулентного течения пленки. Запишите уравнения для расчета теплообмена при конденсации движущегося пара. Как рассчитывается теплообмен при конденсации в трубах при

турбулентном течении двухфазной смеси? Опишите конденсацию на пучках труб и методы ее интенсификации.

Необходимо ответить на вопросы по теме “Физические закономерности кипения и расчет теплообмена”.

Опишите условия зарождения парового зародыша в объеме перегретой жидкости и на твердой поверхности нагрева. Опишите рост паровых пузырьков в объеме однородно перегретой жидкости: проведите анализ «пределных» схем роста, запишите решения для динамической инерционной и тепловой энергетической схем роста. В чем состоят особенности роста при больших числах Якоба? В чем состоят основные закономерности роста и отрыва паровых пузырьков на твердой поверхности?

Опишите “кривую кипения”. Как рассчитывается теплообмен при пленочном и переходном кипении? Как рассчитывается теплообмен при пузырьковом кипении в большом объеме (в чем состоит механизм процесса, обоснование расчетного уравнения).

Опишите кризисы кипения в большом объеме. Как происходит характер изменения среднemasсовой температуры жидкости, температуры стенки, расходного массового паросодержания по длине обогреваемого канала? Опишите теплообмен при кипении жидкости в условиях ее вынужденного движения. Опишите кризис теплоотдачи при кипении в трубах.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: закономерности теплообмена при конденсации и кипении	1.1. В каком диапазоне температур возможна конденсация пара в жидкую фазу? В каких технологических процессах имеют дело с объемной конденсацией? 2. При каких допущениях решалась задача Нуссельта о конденсации на вертикальной плоскости? К какому виду на основе этих допущений упрощается уравнение энергии (8.3)? 3. По какому закону изменяется толщина пленки конденсата по высоте пластины? Как и почему влияют на нее температурный напор, теплопроводность жидкости и гравитационное ускорение? 4. В какой части решение задачи о конденсации на вертикальной плоскости остается справедливым для конденсации на поверхности горизонтального цилиндра? В чем основное отличие этих двух задач? 5. Чем отличаются формулы для среднего КТО на вертикальной плоскости и на горизонтальной трубе? Как следует ориентировать одиночную трубу большой длины, чтобы обеспечить больший расход конденсируемого пара? 6. Как развиваются волны на поверхности пленки при конденсации на вертикальной стенке? Какое влияние они оказывают на теплообмен, как оно учитывается в расчетах? 7. Вывод уравнения для расчета среднего КТО при смешанном течении пленки конденсата на протяженной поверхности. 8. Как изменяется КТО при конденсации пара по длине канала согласно формуле Бойко-Кружилина? Каким способом удается поддерживать высокий
---	--

	уровень КТО в многоходовом конденсаторе? 2.1. Почему зародыш паровой фазы под уровнем жидкости возникает только в метастабильной (перегретой) жидкости? 2. Как гомогенное зародышеобразование реализуется в экспериментах? Какие перегревы жидкости при этом необходимы? 3. Как и почему сказываются на парообразовании режимные параметры (давление, тепловой поток) и растворенные в жидкости газы? 4. Как получаются асимптотические пределы для решения Скривена? Как получен закон роста (9.19) и как он согласуется с результатами экспериментов? 5. Какие асимптоты имеет уравнение (9.24) для роста пузырька на стенке, каковы области их применения? 6. Каковы закономерности отрыва паровых пузырьков от стенки при больших числах Якоба? 7. Какие последовательные стадии процесса рассматривает модель теплообмена при переходном кипении? Как длительность контакта жидкость-стенка зависит от перегрева стенки? 8. Почему аналогия с процессами однофазной конвекции не объясняет закономерностей теплообмена при пузырьковом кипении? Какая особенность пузырькового кипения отличает его от других процессов конвективного теплообмена и позволяет объяснить высокую интенсивность переноса тепла? 9. Какие допущения позволяют определить составляющую теплового потока q_1 за счет испарения по границам сухих пятен? 10. Каковы главные допущения гидродинамической теории кризиса пузырькового кипения? Насколько они соответствуют реальной структуре двухфазной области у стенки перед кризисом? Как строится расчетная формула и как она согласуется с результатами опытов?
--	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

7 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

1. Механизм свободной конвекции. Обоснование структуры формулы для максимальной скорости свободной конвекции. Приближение Буссинеска и его обоснование.
2. Аналогия процессов тепло- и массообмена; содержание понятия, условия аналогии, использование в экспериментальных исследованиях и построении расчетных формул. Аналогия процессов переноса импульса и энергии в пограничном слое.
3. Опытный участок для определения теплоотдачи при переменной плотности теплового потока на стенке представляет собой круглую трубку внутренним диаметром $d = 20$ мм. Участок охлаждается водой при давлении $p = 30$ МПа, $T_{вх} = 390$ С. Расход воды $G = 120$ кг/час. Определить температуру воды в сечении, отстоящем от входа на 1 м, если плотность теплового потока изменяется вдоль трубы по линейному закону $q_c = (0,2 + 1,8x) \cdot 10^5$ Вт/м².

Процедура проведения

Экзамен проводится в устной форме. Время подготовки - 1,5 часа. Студент должен ответить на вопросы билета (два теоретических вопроса) и решить задачу.

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

1. Компетенция/Индикатор: ИД-1_{ПК-1} Владеет навыками расчета процессов гидродинамики и теплообмена в энергетическом оборудовании

Вопросы, задания

1. Основные понятия. Классификация процессов конвективного теплообмена. Основное содержание задач конвективного теплообмена. Связь молекулярного и конвективного переноса тепла.
2. Физический смысл коэффициента теплоотдачи. Толщина эквивалентной пленки. Коэффициент теплоотдачи как гидродинамический параметр.
3. Качественные закономерности процесса и расчетные формулы для теплообмена в пограничном слое. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины. Число Прандтля. Теплообмен при турбулентном обтекании плоской пластины.
4. Качественные закономерности процесса и расчетные формулы для теплообмена при течении в каналах. Тепловой баланс, среднемассовая температура. Изменение закономерностей течения и теплообмена по длине трубы. Теплообмен при ламинарном течении в трубах. Теплообмен при турбулентном течении в круглой трубе.
5. Общая форма законов сохранения.
6. Закон сохранения массы.
7. Закон сохранения импульса. Тензоры плотности потока импульса, давлений и вязких напряжений. Различные формы дифференциального уравнения сохранения импульса.
8. Закон сохранения энергии. Плотность потока энергии. Различные формы дифференциального уравнения энергии.
9. Законы сохранения для смесей. Уравнение сохранения массы компонента в бинарной смеси. Молекулярный поток массы компонента в смеси. Влияние молекулярных потоков массы компонента на перенос импульса и энергии в смеси.

10. Система уравнений сохранения для конвективного теплообмена; аналогия процессов переноса.
11. Подобие физических явлений.
12. Теоремы теории подобия. Первая теорема теории подобия. Вторая теорема теории подобия. Третья теорема теории подобия.
13. Физический смысл критериев и чисел подобия. Гидродинамические числа подобия. Числа подобия в процессах теплообмена. Числа подобия в процессах массообмена. Параметрические числа подобия (симплексы).
14. Практическое использование теории подобия. Теория подобия как научная основа экспериментальных исследований. Теория подобия и моделирование.
15. Теория размерностей.
16. Уравнения температурного пограничного слоя.
17. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины. Постановка задачи и анализ методами теории размерностей. Основные результаты задачи Блазиуса. Точное решение задачи о теплообмене. Теплоотдача в предельных по числу Прандтля случаях.
18. Переход к турбулентному течению. Результаты теоретического анализа. Анализ влияния различных факторов на турбулентный переход.
19. Осредненные уравнения импульса и энергии при турбулентном течении. Вывод осредненных уравнений. Анализ осредненных уравнений. Осредненные уравнения в приближении пограничного слоя.
20. Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Внутренние масштабы турбулентного течения. Структура пристеночной турбулентной области. Моделирование переноса импульса в пристеночной турбулентной области.
21. Теплообмен при турбулентном течении в пограничном слое. Аналогия Рейнольдса. Аналогия Рейнольдса, модифицированная на основе двухслойной модели пристеночной турбулентной области. Анализ результатов. Рекомендации по расчету.
22. Теплообмен при поперечном обтекании труб. Гидродинамика и теплообмен при поперечном обтекании кругового цилиндра. Теплообмен в пучках труб.
23. Механизм и математическое описание свободной конвекции. Качественный анализ. Приближение Буссинеска. Математическое описание свободной конвекции в приближениях Буссинеска и пограничного слоя. Максимальная скорость свободной конвекции. Оценка толщины свободноконвективного пограничного слоя.
24. Теплообмен при свободной конвекции у вертикальной плоскости. Постановка задачи. Приближенное аналитическое решение. Турбулентная свободная конвекция на вертикальной плоскости.
25. Свободная конвекция у поверхности цилиндров и сфер. Горизонтальные цилиндры большого диаметра. Горизонтальные цилиндры малого диаметра. Свободная конвекция на сферических поверхностях.
26. Свободная конвекция на горизонтальной плоскости и в замкнутых объемах. Горизонтальные поверхности и прослойки. Свободная конвекция в замкнутых объемах.
27. Теплообмен при течении жидкостей в каналах. Постановка задачи. Содержание анализа. Математическое описание для круглой трубы.
28. Общие закономерности стабилизированного течения и теплообмена. Гидродинамическая и тепловая (температурная) стабилизация. Влияние вида граничных условий на стабилизированный теплообмен.
29. Обобщенные (интегральные) количественные характеристики стабилизированного теплообмена в круглой трубе при $q_c = \text{const}$. Профили скорости, теплового потока, температуры. Общее выражение для коэффициента теплоотдачи (интеграл Лайона).
30. Стабилизированный теплообмен при ламинарном течении в каналах. Круглые трубы. Призматические каналы.

31. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении в круглой трубе. Качественный анализ профилей скорости, теплового потока и температуры. Результаты теоретического исследования теплообмена. Расчетные уравнения для теплоотдачи.
32. Теплообмен в начальном термическом участке при ламинарном течении в круглой трубе. Постановка задачи. Приближенное решение Левека для $T_c = \text{const}$. Задача Гретца—Нуссельта для $T_c = \text{const}$. Теплообмен в начальном термическом участке при $q_c = \text{const}$.
33. Теплообмен в начальном гидродинамическом участке при ламинарном течении в круглой трубе.
34. Начальные участки при турбулентном течении в трубах. Начальный термический участок. Начальный гидродинамический участок.
35. Электрическая шина, изготовленная из стали ($\rho_{эл} = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) с размерами $l \times b \times \delta = 5 \text{ м} \times 0,05 \text{ м} \times 0,002 \text{ м}$, охлаждается продольным потоком воздуха с $v = 20 \text{ м/с}$ и $T = 20^\circ \text{C}$. По шине, вдоль ее длины, пропускается электрический ток $I = 100 \text{ А}$. Вычислить максимальную и среднюю по поверхности температуры, если: а) шина обдувается вдоль ее ширины b ; б) шина обдувается вдоль ее длины l .
36. Определить температуру внутренней поверхности трубы с диаметром $d = 20 \text{ мм}$ на расстоянии $x = 800 \text{ мм}$ от входа, если в ней нагревается воздух при $q_c = 2,5 \text{ кВт/м}^2$. Расход воздуха составляет $G = 21,6 \text{ кг/час}$, а его температура на входе в трубку равна 20°C .
37. По трубе с диаметром 10 мм протекает масло МК с расходом 120 кг/ч . Температура масла на входе 80°C , на выходе 76°C . Температура стенки 30°C . Найти длину трубы.
38. Воздушный поток со скоростью 1 м/с и температурой 10°C обдувает электропровод диаметром 5 мм под углом атаки 60° . Найти коэффициент теплоотдачи и силу тока в проводе, если удельное электросопротивление провода $0,15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а температура на поверхности 90°C .
39. Найти средний коэффициент теплоотдачи в охладителе воздуха при поперечном обтекании пучка из восьми рядов труб с шахматным расположением. Наружный диаметр труб 16 мм , скорость воздуха в узком сечении пучка 15 м/с , средняя температура воздуха 160°C . Принять размеры шагов труб $s_1 = 38 \text{ мм}$, $s_2 = 21 \text{ мм}$.
40. Электропровод без изоляции расположен горизонтально и имеет диаметр 2 мм и температуру 90°C на поверхности. Он охлаждается воздухом с температурой 20°C путем свободной конвекции. Какую температуру на поверхности будет иметь провод, если его покрыть изоляцией толщиной 1 мм , теплопроводность которой $0,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$? Силу тока и электросопротивление провода считать прежними, а коэффициент теплоотдачи от изоляции к воздуху принять равным $15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Что такое толщина эквивалентной пленки?

Ответы:

1. толщина заторможенного слоя жидкости, имеющего термическое сопротивление при передаче тепла теплопроводностью, равное термическому сопротивлению в реальном процессе конвективного теплообмена
2. толщина слоя жидкости, в пределах которого происходит изменение избыточной температуры на 99 % от ее максимального значения $\vartheta_c = \Delta T$
3. толщина тонкого слоя жидкости, в пределах которого абсолютно доминирует перенос тепла теплопроводностью

Верный ответ: 1

2. Что такое толщина теплопроводного подслоя?

Ответы:

1. толщина заторможенного слоя жидкости, имеющего термическое сопротивление при передаче тепла теплопроводностью, равное термическому сопротивлению в реальном процессе конвективного теплообмена
2. толщина слоя жидкости, в пределах которого происходит изменение избыточной температуры на 99 % от ее максимального значения $\vartheta_c = \Delta T$
3. толщина тонкого слоя жидкости, в пределах которого абсолютно доминирует перенос тепла теплопроводностью

Верный ответ: 3

3. Что такое толщина температурного пограничного слоя?

Ответы:

1. толщина заторможенного слоя жидкости, имеющего термическое сопротивление при передаче тепла теплопроводностью, равное термическому сопротивлению в реальном процессе конвективного теплообмена
2. толщина слоя жидкости, в пределах которого происходит изменение избыточной температуры на 99 % от ее максимального значения $\vartheta_c = \Delta T$
3. толщина тонкого слоя жидкости, в пределах которого абсолютно доминирует перенос тепла теплопроводностью

Верный ответ: 2

4. Формулировка первой теоремы теории подобия:

Ответы:

1. Группа подобных явлений имеет одинаковые уравнения подобия.
2. Подобные явления имеют одинаковые (численно равные) числа подобия.
3. Явления подобны, если подобны их условия однозначности, а определяющие критерии подобия, составленные из величин, входящих в условия однозначности, численно равны.

Верный ответ: 2

5. Какое из приведенных чисел подобия является гидродинамическим?

Ответы:

1. Число Пекле (Pe)
2. Число Эккерта (Ec)
3. Число Шервуда (Sh)
4. Число Галилея (Ga)

Верный ответ: 4

6. Как зависит локальный коэффициент теплоотдачи от продольной координаты при ламинарном обтекании плоской пластины?

Ответы:

1. $\sim x$
2. $\sim x$
3. $\sim x$
4. $\sim x$

Верный ответ: 2

7. Как зависит толщина динамического пограничного слоя от продольной координаты при ламинарном обтекании плоской пластины?

Ответы:

1. $\sim x$
2. $\sim x$
3. $\sim x$
4. $\sim x$

Верный ответ: 3

8. Как зависит толщина динамического пограничного слоя от продольной координаты при турбулентном обтекании плоской пластины?

Ответы:

1. $\sim x$
2. $\sim x$
3. $\sim x$
4. $\sim x$

Верный ответ: 1

9. Критическое значение числа Рейнольдса при переходе от ламинарного к турбулентному режиму внешнего обтекания плоской пластины составляет:

Ответы:

1. $3 \cdot 10$
2. 2300
3. 2100
4. 1600

Верный ответ: 1

10. Свободная конвекция – это

Ответы:

1. движение, вызванное градиентом поверхностного натяжения
2. результат воздействия массовых сил на жидкость с неоднородной плотностью
3. движение жидкости под действием внешнего нагнетательного устройства

Верный ответ: 2

11. Число Грасгофа при граничных условиях первого рода определяется как

Ответы:

1. $Gr = (g \beta q x) / \nu a \lambda$
2. $Gr = \frac{g \beta q x}{\nu \lambda}$
3. $Gr = (g \beta \Delta T x) / \nu$
4. $Gr = (g \beta \Delta T x) / \nu a$

Верный ответ: 3

12. Локальный коэффициент теплоотдачи для описания теплообмена при ламинарной свободной конвекции у вертикальной плоскости при граничных условиях первого рода зависит от вертикальной координаты x :

Ответы:

1. $\sim x$
2. $\sim x$
3. $\sim x$
4. $\alpha_x^x \neq \alpha_x^x x_x (x)$?

Верный ответ: 3

13. Локальный коэффициент теплоотдачи для описания теплообмена при турбулентной свободной конвекции у вертикальной плоскости при граничных условиях первого рода зависит от вертикальной координаты x :

Ответы:

1. $\sim x$
2. $\sim x$
3. $\sim x$
4. $\alpha_x^x \neq \alpha_x^x x_x (x)$?

Верный ответ: 4

14. В условиях начального термического участка при ламинарном течении в трубе при граничных условиях первого рода безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта) можно рассчитать по соотношению:

Ответы:

1. $Nu = 1,03(x/dPe)$
2. $Nu = 1,31(x/dPe)$
3. $Nu = 0,023 \sqrt{\{Pr\}}$

$$4. Nu = \frac{RePr\xi/8}{1+900/\sqrt{1+12,7\sqrt{(\xi/8)(Pr-1)}}$$

Верный ответ: 1

15. При турбулентном течении в трубе безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта) можно рассчитать по соотношению:

Ответы:

$$1. Nu = 1,03(x/dPe)$$

$$2. Nu = 1,31(x/dPe)$$

$$3. Nu = 0,332 \sqrt{\xi} \sqrt{Pr}$$

$$4. Nu = \frac{RePr\xi/8}{1+900/\sqrt{1+12,7\sqrt{(\xi/8)(Pr-1)}}$$

Верный ответ: 4

II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Работа не выполнена или выполнена преимущественно неправильно

III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

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

8 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

1. Специальные условия совместности: качественный – анализ реальных неравновесных процессов, результаты линейной теории для теплообмена в однофазной среде и фазовых переходов в однокомпонентной среде.
2. Теплоотдача при пленочной конденсации пара: анализ допущений к задаче Нуссельта, рекомендации по расчету.
3. Для изучения теплообмена при кипении в потоке жидкости в качестве рабочего участка используется труба внутренним диаметром 8 мм длиной 0,5 м, обогреваемая электрически. Рассчитать температуру внутренней поверхности трубы, если мощность,

нагревателя 400 Вт, охлаждающая среда - насыщенная вода при давлении 0,3 МПа, скорость которой на входе в трубу - 0,4 м/с. Как (качественно) изменится температура стенки, если на вход подается недогретая до температуры насыщения вода?

Процедура проведения

Экзамен проводится в устной форме. Время подготовки - 1,5 часа. Студент должен ответить на вопросы билета (два теоретических вопроса) и решить задачу.

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

1. Компетенция/Индикатор: ИД-1_{ПК-1} Владеет навыками расчета процессов гидродинамики и теплообмена в энергетическом оборудовании

Вопросы, задания

1. Влияние переменности теплофизических свойств на теплообмен и гидравлическое сопротивление при течении в трубах. Влияние переменности свойств жидкости на теплообмен и гидравлическое сопротивление. Влияние переменности свойств газов на теплообмен и гидравлическое сопротивление.
2. Влияние свободной конвекции на теплообмен при вынужденном течении в трубах. Влияние свободной конвекции на теплообмен при ламинарном вынужденном течении в круглой трубе.
3. Теплообмен в однофазной сверхкритической области.
4. Интенсификация однофазного конвективного теплообмена. Влияние микроструктуры поверхности на гидравлическое сопротивление. Принципы и методы интенсификации конвективного однофазного теплообмена.
5. Предмет, методы анализа и модели двухфазных систем.
6. Универсальные условия совместности. Вывод в общей форме. Развернутая запись универсальных условий совместности. Универсальные условия совместности для частных случаев.
7. Универсальные условия совместности в системе отсчета наблюдателя. Скорость движения границы раздела фаз. Запись универсальных условий совместности в лабораторной системе отсчета.
8. Специальные условия совместности. Общие положения. Результаты линейной теории для некоторых задач гидродинамики и теплообмена в однокомпонентной среде. Специальные условия совместности в квазиравновесном приближении.
9. Количественные характеристики двухфазных потоков в каналах. Паросодержание. Скорости, плотность смеси. Гомогенная модель для трения.
10. Теплообмен при конденсации. Общие положения. Определения. Классификация. Пленочная и капельная конденсация.
11. Теплообмен при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной плоскости. Постановка задачи. Решение задачи.
12. Конденсация пара на наклонных и криволинейных поверхностях. Конденсация на наклонной плоскости. Конденсация на поверхности горизонтального цилиндра.
13. Современная методика расчета теплообмена при конденсации неподвижного пара. Анализ допущений Нуссельта. Практические рекомендации по расчету.
14. Теплообмен при турбулентном течении пленки конденсата.
15. Теплообмен при конденсации пара, движущегося внутри труб. Общие положения. Конденсация в охлаждаемых каналах при турбулентном течении смеси.
16. Конденсация пара в промышленных аппаратах и методы ее интенсификации. Конденсация на пучках горизонтальных труб. Методы интенсификации теплообмена при конденсации.

- 17.Зарождение паровой фазы. Общие положения. Образование паровой фазы в объеме однородно перегретой жидкости. Парообразование на твердой стенке (при кипении).
- 18.Рост паровых пузырьков в объеме равномерно перегретой жидкости. Предельные схемы роста. Динамическая инерционная схема роста парового пузырька. Тепловая энергетическая схема роста. Рост пузырька при больших числах Якоба.
- 19.Динамика паровых пузырьков при кипении. Основные результаты опытных наблюдений. Приближенная модель роста парового пузырька на обогреваемой стенке. Условия отрыва паровых пузырьков от твердой поверхности.
- 20.Качественный анализ теплоотдачи при кипении.
- 21.Теплообмен при пленочном и переходном кипении. Пленочное кипение при ламинарном течении пара. Пленочное кипение при турбулентном течении пара. Теплообмен при переходном кипении.
- 22.Теплообмен при пузырьковом кипении. Качественные закономерности процесса. Приближенная теория теплообмена при пузырьковом кипении.
- 23.Теплообмен при кипении жидкости в условиях вынужденного движения. Пузырьковое кипение в конвективном потоке. Теплообмен при высоких паросодержаниях потока.
- 24.Кризисы кипения в условиях свободного движения. Гидродинамическая модель кризиса. Кризис как результат роста площади сухих пятен. Кризис пленочного кипения.
- 25.Кризис теплообмена при кипении жидкостей в каналах. Общие закономерности. Модель кризиса в высокоскоростных потоках недогретой жидкости.
- 26.Найти площадь поверхности теплообмена испарителя, производительность которого по вторичному пару 2,5 кг/с. Давление вторичного пара 0,5 МПа. Температура воды на входе в испаритель равна температуре насыщения. Греющей средой является сухой насыщенный пар при давлении 0,7 МПа. Конденсат греющего пара в испарителе не переохлаждается. Коэффициент теплопередачи равен 1800 Вт/(м²·К).
- 27.По вертикальной стойке в теплообменном аппарате стекает пленка конденсата, возникшая при охлаждении сухого насыщенного пара. Высота стойки 3 м, температура ее поверхности 70 °С. Водяной пар конденсируется при 110 °С. Определить высоту стойки, на которой будет ламинарное течение конденсата. Найти наименьший коэффициент теплоотдачи на ламинарном участке течения пленки. Найти средний по всей высоте стойки коэффициент теплоотдачи.
- 28.В парогенераторе АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 должно производиться с 1 м² поверхности нагрева 0,11 кг/с пара при давлении 4 МПа. Кипение воды происходит на наружной поверхности труб. Теплоноситель (вода) движется по трубам с такой скоростью, что $\alpha = 32000$ Вт/(м²·К). Рассчитать среднюю температуру теплоносителя. Толщина стенки трубы из нержавеющей стали $d = 1,5$ мм, теплопроводность стали 20 Вт/(м·К).

II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

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

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

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

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

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

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Работа не выполнена или выполнена преимущественно неправильно

III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

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