

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА

Кафедра теоретических основ теплотехники

ТЕПЛОМАССООБМЕН

Учебно-методическое пособие
для выполнения контрольных работ
студентами факультета заочного и вечернего обучения
теплотехнических специальностей

Иваново 2024

УДК 621.187.1

Б 94

**Бухмиров В.В., Бушуев Е.Н., Родионова М.В.,
Гусенкова Н.П.**

Б 94 Теплообмен: учебно-метод. пособие для выполнения контрольных работ студентами факультета заочного и вечернего обучения теплотехнических специальностей / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». –Иваново, 2023. – 84 с.
ISBN

Учебно-методическое пособие содержит индивидуальные задания для выполнения студентами контрольных работ, теоретические положения по рассматриваемым разделам дисциплины «Теплообмен», примеры решения задач по соответствующим темам, требования к оформлению работ.

Предназначено для студентов факультета заочного и вечернего обучения, обучающихся по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Энергетическое машиностроение».

Ил. 11. Библиогр.: 7 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

канд. техн. наук, доц. Т.Е. Созинова

РЕЦЕНЗЕНТ

канд. техн. наук, доц. Корочкина Е.Е.

ISBN

© В.В. Бухмиров, Е.Н. Бушуев,
М.В. Родионова, Н.П. Гусенкова, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	5
2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ДИСЦИПЛИНЫ	5
3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1	7
3.1. Теоретическая часть контрольной работы	8
3.2. Практическая часть контрольной работы	15
4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2	28
4.1. Теоретическая часть контрольной работы	28
4.2. Практическая часть контрольной работы	33
5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1	52
5.1. Примеры решения задач по темам «Стационарная теплопроводность в плоской стенке» и «Стационарная теплопроводность в цилиндрической стенке» (задачи № 1 и 2)	52
5.2. Пример решения задач по теме «Конвективный теплообмен» (задача № 3)	56
5.3. Пример решения задач по теме «Конвективный теплообмен при фазовых превращениях» (задача № 4)	61
5.4. Пример решения задач по теме «Теплообмен излучением» (задача № 5)	64
6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2	66
6.1. Примеры решения задач по темам «Стационарная теплопередача через плоскую стенку» и «Стационар-	

ная теплопередача через цилиндрическую стенку» (задачи № 1 и № 2)	67
6.2. Примеры решения задач по теме «Теплообменные аппараты» (задача № 3)	73
7. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬ- НОЙ РАБОТЫ	82
8. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	83

1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Дисциплина «Тепломассообмен» является базовой при обучении бакалавров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Энергетическое машиностроение». Дисциплина призвана подготовить студентов к решению задач тепломассообмена при изучении материала профильных курсов, при выполнении выпускной квалификационной работы, а также научить использовать полученные знания в своей профессиональной деятельности.

Для изучения дисциплины студентам необходимо знание основ высшей математики, физики, механики жидкости и газа, технической термодинамики.

При изучении дисциплины «Тепломассообмен» студентам необходимо изучить литературу, приведённую в разделе *Библиографический список*, а также выполнить две контрольные работы – контрольной работы № 1 в 5 учебном семестре и контрольной работы № 2 в 6 учебном семестре.

2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Основные понятия тепломассообмена

- 1.1. Два способа использования теплоты.
- 1.2. Тепломассообмен. Задачи ТМО.
- 1.3. Температурное поле. Изотермическая поверхность. Градиент температуры.
- 1.4. Количество теплоты. Тепловой поток. Удельные тепловые потоки.
- 1.5. Элементарные способы передачи теплоты. Сложный теплообмен.
- 1.6. Расчет теплового потока в процессе теплопроводности, конвективного и лучистого теплообмена.

Литература: глава 1 [1, 2].

Тема 2. Теплопроводность

2.1. Механизм теплопроводности. Закон Фурье – основной закон теории теплопроводности.

2.2. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности для решения дифференциального уравнения теплопроводности. Методы решения дифференциального уравнения теплопроводности.

2.3. Графическое представление аналитического решения дифференциального уравнения теплопроводности при граничных условиях III рода (номограммы Д.В. Будрина).

2.4. Стационарная теплопроводность в плоской и цилиндрической стенках.

Литература: глава 3 [1], глава 5 [2].

Тема 3. Конвективный теплообмен

3.1. Основные понятия и определения.

3.2. Основы теории подобия.

3.3. Критерии подобия конвективного теплообмена.

3.4. Применение эмпирических формул для расчета конвективной теплоотдачи. Теплоотдача при свободной конвекции.

3.5. Применение эмпирических формул для расчета конвективной теплоотдачи. Теплоотдача при вынужденной конвекции.

Литература: глава 4 [1].

Тема 4. Теплообмен при фазовых превращениях

4.1. Теплообмен при конденсации.

4.2. Теплообмен при кипении.

Литература: глава 5 [1].

Тема 5. Теплообмен излучением

5.1. Основные понятия и определения лучистого теплообмена.

5.2. Основные законы излучения.

Литература: глава 6 [1].

Тема 6. Стационарная теплопередача

6.1. Понятие процесса теплопередачи.

6.2. Расчет теплопередачи через плоскую и цилиндрическую стенки.

6.3. Алгоритм расчета теплопередачи через непроницаемые стенки.

Литература: глава 7 [1], глава 4 [2].

Тема 7. Теплообменные аппараты

7.1. Классификация теплообменных аппаратов.

7.2. Основные уравнения теплового расчета рекуперативного теплообменного аппарата.

Литература: главы 7, 8 и 9 [1].

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1

Контрольная работа № 1 по дисциплине «Тепломассообмен» (5 семестр) состоит из:

– теоретической части, включающей 7 вопросов, на которые необходимо дать развернутые ответы;

– практической части, включающей 5 задач.

Выбор варианта заданий для выполнения контрольной работы определяется номером зачетной книжки обучающегося. Номер зачетной книжки студента ИГЭУ совпадает с номером студенческого билета.

Номер зачетной книжки обычно включает шесть цифр. Три первые цифры соответствуют номеру факультета и году поступления в ВУЗ. Например, для студента, поступившего в ИГЭУ в 2022 году, номер зачетной книжки может иметь вид 622997.

В тексте заданий использована следующая индексация:

ЗК1 – первая цифра номера зачетной книжки;

ЗК2 – вторая цифра номера зачетной книжки;

- ЗК3 – третья цифра номера зачетной книжки;
- ЗК4 – четвертая цифра номера зачетной книжки;
- ЗК5 – пятая цифра номера зачетной книжки;
- ЗК6 – шестая цифра номера зачетной книжки.

3.1. Теоретическая часть контрольной работы

Вариант задания для выполнения контрольной работы выбирается студентом в соответствии с последней цифрой номера зачетной книжки (студенческого билета) (ЗК6).

Вариант № 0

Вопрос 1. Дайте определения понятий: температурное поле, стационарное и нестационарное температурное поле. Приведите примеры записи температурных полей.

Вопрос 2. Сформулируйте основной закон теплопроводности – закон Фурье. Напишите математическую формулировку закона и поясните входящие в него величины.

Вопрос 3. Дайте краткую характеристику начальных условий, граничных условия I, II, III и IV рода.

Вопрос 4. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке ($\delta_1 = \delta_2$), если $\lambda_1 > \lambda_2$ в случае стационарного теплообмена. Объясните различие в полях температуры каждого слоя.

Вопрос 5. Как изменяется температура в тепловом пограничном слое в процессе теплоотдачи?

Вопрос 6. Дайте описание пленочной и капельной конденсации. Условия существования этих процессов.

Вопрос 7. Определить коэффициент излучения серого тела, если плотность потока собственного излучения равна $E_{\text{соб}} = 2550 \text{ Вт/м}^2$, а температура поверхности $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вариант № 1

Вопрос 1. Дайте определение изотермическая поверхность. Перечислите свойства изотермических поверхностей. Изотермические поверхности в телах простой формы.

Вопрос 2. Поясните физический смысл коэффициента теплопроводности. Напишите формулу, лежащую в основе его экспериментального определения. Приведите числовые значения коэффициента теплопроводности для меди, стали, бетона, минеральной ваты и воздуха при нормальных условиях.

Вопрос 3. Изобразите схематично графики распределения температуры в цилиндрической стенке при подводе теплоты извне, если коэффициент теплопроводности не зависит от температуры.

Вопрос 4. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке ($\delta_1 = \delta_2$), если $\lambda_1 < \lambda_2$ в случае стационарного теплообмена. Объясните различие в полях температуры каждого слоя.

Вопрос 5. Оценить влияние температуры воздуха на интенсивность конвективной теплоотдачи от него к стенке трубы.

Вопрос 6. Опишите особенности критерия Рейнольдса при конденсации.

Вопрос 7. Рассчитать плотность потока эффективного излучения лученепрозрачного тела, если $E_{\text{пад}} = 20000 \text{ Вт/м}^2$; $A = 0,4$; $E_{\text{соб}} = 10 \text{ кВт/м}^2$?

Вариант № 2

Вопрос 1. Напишите формулу и дайте определение градиента температуры. Градиент температуры в декартовой системе координат.

Вопрос 2. Что характеризует коэффициент температуропроводности? Опишите связь коэффициента температуропроводности с коэффициентом теплопроводности и удельной теплоемкостью.

Вопрос 3. Методы решения краевой задачи теории теплопроводности.

Вопрос 4. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке для случая, если коэффициенты теплопроводности равны $\lambda_1 = \lambda_2$, а толщины слоев разные $\delta_1 > \delta_2$ в случае стационарного теплообмена.

Вопрос 5. Перечислите определяющие критерии для ламинарного режима течения среды при вынужденной конвекции.

Вопрос 6. Опишите метод расчета теплоотдачи при пленочной конденсации пара на наклонной поверхности.

Вопрос 7. Определить поглощательную способность серого тела, если плотность потока собственного излучения равна $E_{\text{соб}} = 2550 \text{ Вт/м}^2$, а температура поверхности $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вариант № 3

Вопрос 1. Дайте определения понятий количество теплоты и тепловой поток. Укажите обозначения и единицы измерения этих величин.

Вопрос 2. Дифференциальное уравнение теплопроводности в декартовой системе координат. Напишите математическое выражение и поясните входящие в него величины.

Вопрос 3. Поясните физический смысл коэффициента теплопроводности. Напишите формулу, лежащую в основе его экспериментального определения. Приведите числовые значения коэффициента теплопроводности для меди, стали, бетона, минеральной ваты и воздуха при нормальных условиях.

Вопрос 4. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке для случая, если коэффициенты теплопроводности равны $\lambda_1 = \lambda_2$, а толщины – разные $\delta_1 < \delta_2$ в случае стационарного теплообмена.

Вопрос 5. Опишите алгоритм определения коэффициента теплоотдачи с помощью теории подобия.

Вопрос 6. Как рассчитать теплоту, выделяющуюся при конденсации влажного насыщенного водяного пара, сухого насыщенного водяного пара и перегретого пара.

Вопрос 7. Определить степень черноты поверхности, если коэффициент излучения для нее $4,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Вариант № 4

Вопрос 1. Дайте определения понятий поверхностная, линейная и объемная плотность теплового потока. Укажите обозначения и единицы измерения этих величин.

Вопрос 2. Дифференциальное уравнение теплопроводности для тел простейшей формы. Напишите математическое выражение и поясните входящие в него величины.

Вопрос 3. Перечислите условия однозначности, необходимые для решения дифференциального уравнения теплопроводности.

Вопрос 4. Изобразите график изменения температуры по толщине плоской трехслойной стенки при стационарном режиме теплопроводности, если толщины слоев $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$, а коэффициенты теплопроводности слоев равны $\lambda_1 = 1,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Вопрос 5. Опишите черты сходства и отличия критериев Рейнольдса и Пекле.

Вопрос 6. Сформулируйте условия протекания стационарного процесса конденсации.

Вопрос 7. Определить плотность теплового потока, излучаемого телом, если температура его поверхности $50 \text{ }^\circ\text{C}$, а коэффициент излучения $3,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Вариант № 5

Вопрос 1. Перечислите и дайте определения элементарных способов передачи теплоты.

Вопрос 2. Дифференциальное уравнение теплопроводности для стационарных процессов. Напишите математическое выражение и поясните входящие в него величины.

тическое выражение и поясните входящие в него величины.

Вопрос 3. Что характеризует коэффициент температуропроводности. Опишите связь коэффициента температуропроводности с коэффициентом теплопроводности и удельной теплоемкостью.

Вопрос 4. Изобразите график изменения температуры по толщине плоской трехслойной стенки при стационарном режиме теплопроводности, если толщины слоев $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$, а коэффициенты теплопроводности слоев равны $\lambda_1 = 2,0 \text{ Вт/(м·К)}$, $\lambda_2 = 1,0 \text{ Вт/(м·К)}$, $\lambda_3 = 0,5 \text{ Вт/(м·К)}$.

Вопрос 5. Дайте понятие критерия теории подобия.

Вопрос 6. Опишите влияние скорости движения пара на теплоотдачу при конденсации.

Вопрос 7. Определить плотность потока собственного излучения серой поверхности (Вт/м^2), если поглощательная способность ее 0,5, а температура поверхности $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вариант № 6

Вопрос 1. Какой вид теплообмена называют сложным. Приведите примеры сложного теплообмена. Дайте определения понятий теплоотдача и теплопередача.

Вопрос 2. Перечислите условия однозначности, необходимые для решения дифференциального уравнения теплопроводности.

Вопрос 3. Дифференциальное уравнение теплопроводности для тел классической формы. Напишите математическое выражение и поясните входящие в него величины.

Вопрос 4. Изобразите график изменения температуры по толщине плоской трехслойной стенки при стационарном режиме теплопроводности, если толщины слоев $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$, а коэффициенты теплопроводности слоев равны $\lambda_1 = 0,5 \text{ Вт/(м·К)}$, $\lambda_2 = 2,0 \text{ Вт/(м·К)}$, $\lambda_3 = 1,0 \text{ Вт/(м·К)}$.

Вопрос 5. Как определяется средний коэффициент теплоотдачи для пучка труб?

Вопрос 6. Опишите влияние примеси в паре неконденсирующихся газов на теплоотдачу при конденсации.

Вопрос 7. Рассчитать плотность потока эффективного излучения лученепрозрачного тела, если $E_{\text{пад}} = 20000 \text{ Вт/м}^2$; $A = 0,4$; $E_{\text{собр}} = 10 \text{ кВт/м}^2$.

Вариант № 7

Вопрос 1. Дайте определения понятий поверхностная, линейная и объемная плотность теплового потока. Укажите обозначения и единицы измерения этих величин.

Вопрос 2. Дайте краткую характеристику начальных условий, граничных условия I, II, III и IV рода.

Вопрос 3. Расчет температурных полей тел простейшей формы по номограммам. Прямая и обратная постановка задачи. Критерии Fo и Bi .

Вопрос 4. Изобразите график изменения температуры по толщине плоской трехслойной стенки при стационарном режиме теплопроводности, если толщины слоев $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$, а коэффициенты теплопроводности слоев равны $\lambda_1=0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_2=1,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_3=2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Вопрос 5. Опишите кривую зависимости теплового потока при кипении от температурного напора.

Вопрос 6. Определить приведенную степень черноты системы из двух параллельных пластин, если степени черноты каждой из пластин одинаковы и равны 0,4.

Вопрос 7. Определить поглощательную способность серой поверхности, если коэффициент излучения для нее $3,4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4)$.

Вариант № 8

Вопрос 1. Какой вид теплообмена называют сложным. Приведите примеры сложного теплообмена. Дайте определения понятий теплоотдача и теплопередача.

Вопрос 2. Методы решения краевой задачи теории теплопроводности.

Вопрос 3. Опишите алгоритм расчета нестационарной теплопроводности в телах простейшей формы по номограммам при обратной постановке задачи.

Вопрос 4. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке для случая, если коэффициенты теплопроводности равны $\lambda_1 = \lambda_2$, а толщины – разные $\delta_1 < \delta_2$ в случае стационарного теплообмена.

Вопрос 5. Опишите черты сходства и отличия критериев Био и Нуссельта.

Вопрос 6. Опишите явление перехода от пузырькового режима кипения к пленочному. Приведите соответствующий график зависимости теплового потока от температурного напора.

Вопрос 7. Во сколько раз увеличится плотность потока собственного излучения поверхности, если температура ее будет повышена с 20 °С до 200 °С?

Вариант № 9

Вопрос 1. Дайте определения понятий количество теплоты и тепловой поток. Укажите обозначения и единицы измерения этих величин.

Вопрос 2. Расчет температурных полей тел простейшей формы по номограммам. Прямая и обратная постановка задачи. Критерии Fo и Bi .

Вопрос 3. Сформулируйте основной закон теплопроводности – закон Фурье. Напишите математическое выражение закона и поясните входящие в него величины.

Вопрос 4. Изобразите графически распределение температуры в двухслойной плоской стенке для случая, если коэффициенты теплопроводности равны $\lambda_1 = \lambda_2$, а толщины слоев разные $\delta_1 > \delta_2$ в случае стационарного теплообмена.

Вопрос 5. Перечислите определяющие критерии для свободной конвекции.

Вопрос 6. Охарактеризуйте влияние паросодержания на кризис кипения жидкости в условиях вынужденного движения ее внутри труб и каналов.

Вопрос 7. Дайте определение спектра излучения. Опишите особенности спектра излучения у твердых и газообразных тел.

3.2. Практическая часть контрольной работы

Вариант задания в каждой из тем («Стационарная теплопроводность в плоской стенке», «Стационарная теплопроводность в цилиндрической стенке», «Конвективный теплообмен», «Конвективный теплообмен при фазовых превращениях», «Теплообмен излучением») выбирается студентом по последней цифре номера зачетной книжки (студенческого билета).

Задача № 1 (тема «Стационарная теплопроводность в плоской стенке»)

Вариант № 0: Определить тепловой поток Q через 1 м^2 плоской двухслойной стенки, а также температуру на границе слоев T_{1-2} , если заданы следующие величины: толщина первого слоя $\delta_1 = (20 + 10 \times \underline{3K5}) \text{ мм}$, толщина второго слоя $\delta_2 = 180 \text{ мм}$, коэффициент теплопроводности материала первого слоя $\lambda_1 = 0,5 \text{ Вт/(м·К)}$, коэффициент теплопроводности материала второго слоя $\lambda_2 = 2,2 \text{ Вт/(м·К)}$, температуры внешних поверхностей стенки $T_{w1} = (100 + \underline{3K3}) \text{ °C}$ и $T_{w2} = 0 \text{ °C}$.

Вариант № 1: Рассчитать плотность теплового потока q через плоскую двухслойную стенку, а также температуру на правой границе стенки T_{w2} , если температура в зоне идеального контакта слоев $T_{1-2} = 61 \text{ °C}$, а температура на

левой границе стенки $T_{w1} = (110 + 5 \times \underline{3K3})$ °C. Толщина первого слоя $\delta_1 = 30$ мм, толщина второго слоя $\delta_2 = 150$ мм, коэффициент теплопроводности материала первого слоя $\lambda_1 = 0,6$ Вт/(м·К), коэффициент теплопроводности материала второго слоя $\lambda_2 = (3,5 + 0,1 \times \underline{3K4})$ Вт/(м·К).

Вариант № 2: Рассчитать плотность теплового потока q через плоскую двухслойную стенку, а также температуру на границе слоев T_{1-2} , если толщина и коэффициент теплопроводности первого по ходу теплового потока слоя $\delta_1 = (40 + 10 \times \underline{3K3})$ мм и $\lambda_1 = 0,7$ Вт/(м·К), термическое сопротивление второго слоя $R_{t2} = (0,057 + \underline{3K5}/50)$ (м²·К)/Вт. Температуры внешних поверхностей стенки $T_{w1} = 120$ °C и $T_{w2} = 10$ °C.

Вариант № 3: Рассчитать плотность теплового потока q через плоскую двухслойную стенку, а также температуру на границе слоев T_{1-2} , если толщина и коэффициент теплопроводности второго по ходу теплового потока слоя $\delta_2 = 380$ мм и $\lambda_2 = (5,6 - \underline{3K5}/2)$ Вт/(м·К), а термическое сопротивление первого слоя $R_{t1} = 0,063$ (м²·К)/Вт. Температуры внешних поверхностей стенки $T_{w1} = (130 - 5 \times \underline{3K3})$ °C и $T_{w2} = 20$ °C.

Вариант № 4: Плотность теплового потока через плоскую двухслойную стенку равна $q = (1135 + 15 \times \underline{3K5})$ Вт/м². Толщины слоев и коэффициенты теплопроводности по ходу теплового потока равны $\delta_1 = (60 + 5 \times \underline{3K4})$ мм; $\delta_2 = 340$ мм; $\lambda_1 = 0,9$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = 6,5$ Вт/(м·К). Рассчитать температуры на внешних поверхностях стенки T_{w1} и T_{w2} , если температура в зоне идеального контакта слоев равна $T_{1-2} = 64,4$ °C.

Вариант № 5: Толщины слоев плоской двухслойной стенки и коэффициенты теплопроводности по ходу теплового потока равны $\delta_1 = (70 + 2 \times \underline{3K3})$ мм; $\delta_2 = 300$ мм;

$\lambda_1 = 1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\lambda_2 = (7,8 - 0,2 \times \underline{3К5}) \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Рассчитать температуру на правой границе стенки T_{w2} и температуру в зоне идеального контакта слоев T_{1-2} , если температура на левой границе $T_{w1} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, а плотность теплового потока $q = 1245 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Вариант № 6: Плотность теплового потока через плоскую двухслойную стенку равна $q = 1219 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Толщины слоев по ходу теплового потока равны $\delta_1 = 80 \text{ мм}$; $\delta_2 = (270 - 20 \times \underline{3К4}) \text{ мм}$. Коэффициент теплопроводности первого слоя $\lambda_1 = 1,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Рассчитать коэффициент теплопроводности второго слоя λ_2 и температуру в зоне идеального контакта слоев T_{1-2} , если температура на внешних границах $T_{w1} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{w2} = (40 + 3 \times \underline{3К3}) \text{ }^\circ\text{C}$.

Вариант № 7: Плотность теплового потока через плоскую двухслойную стенку равна $q = 1521 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Коэффициенты теплопроводности по ходу теплового потока равны $\lambda_1 = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и $\lambda_2 = 9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Толщина первого слоя $\delta_1 = (90 - 5 \times \underline{3К4}) \text{ мм}$. Рассчитать толщину второго слоя δ_2 и температуру в зоне идеального контакта слоев T_{1-2} , если температура на внешних границах $T_{w1} = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{w2} = (30 + 3 \times \underline{3К3}) \text{ }^\circ\text{C}$.

Вариант № 8: Плотность теплового потока через плоскую двухслойную стенку равна $q = (1795 + 50 \times \underline{3К5}) \text{ Вт}/\text{м}^2$. Толщины слоев по ходу теплового потока равны $\delta_1 = (100 - 5 \times \underline{3К3}) \text{ мм}$; $\delta_2 = 220 \text{ мм}$. Коэффициент теплопроводности первого слоя $\lambda_1 = 9,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Рассчитать коэффициент теплопроводности второго слоя λ_2 и температуру на левой границе стенки T_{w1} , если температура на правой границе $T_{w2} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура в зоне идеального контакта слоев $T_{1-2} = 60,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вариант № 9: Плотность теплового потока через плоскую двухслойную стенку равна $q = 1255 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Коэф-

коэффициенты теплопроводности по ходу теплового потока равны $\lambda_1 = 2,0 \text{ Вт/(м·К)}$ и $\lambda_2 = 10 \text{ Вт/(м·К)}$. Толщина первого слоя $\delta_1 = (200 - 5 \times \underline{3K4}) \text{ мм}$. Рассчитать толщину второго слоя δ_2 и температуру на левой границе стенки T_{w1} , если температура на правой границе $T_{w2} = (10 + 2 \times \underline{3K3}) \text{ }^\circ\text{C}$, а температура в зоне идеального контакта слоев $T_{1-2} = 47,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача № 2 (тема «Стационарная теплопроводность в цилиндрической стенке»)

Вариант № 0: Определить тепловой поток Q через цилиндрическую двухслойную стенку длиной $l \text{ метр}$, а также температуру на границах слоев T_{1-2} . Диаметры слоев цилиндра по ходу теплового потока равны $d_1 = 80 \text{ мм}$, $d_2 = 120 \text{ мм}$, $d_3 = (150 + 5 \times \underline{3K3}) \text{ мм}$. Коэффициент теплопроводности материала первого слоя $\lambda_1 = 2,5 \text{ Вт/(м·К)}$, коэффициент теплопроводности материала второго слоя $\lambda_2 = (9,5 + 0,5 \times \underline{3K5}) \text{ Вт/(м·К)}$. Температуры внешних поверхностей стенки $T_{w1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{w2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вариант № 1: Рассчитать линейную плотность теплового потока q_l через цилиндрическую двухслойную стенку, а также температуру на правой границе стенки T_{w2} , если температура в зоне идеального контакта слоев $T_{1-2} = (85 + \underline{3K5}) \text{ }^\circ\text{C}$, а температура на левой границе стенки $T_{w1} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Внутренний диаметр цилиндра $d_1 = (100 - 5 \times \underline{3K4}) \text{ мм}$. Толщина первого слоя $\delta_1 = 25 \text{ мм}$, толщина второго слоя $\delta_2 = 15 \text{ мм}$, коэффициент теплопроводности материала первого слоя $\lambda_1 = 3 \text{ Вт/(м·К)}$, коэффициент теплопроводности материала второго слоя $\lambda_2 = 6,3 \text{ Вт/(м·К)}$.

Вариант № 2: Рассчитать линейную плотность теплового потока q_l через цилиндрическую двухслойную стенку, а также температуру на границе слоев T_{1-2} , если

внутренний диаметр цилиндра $d_1 = (200 - 10 \times \underline{3K4})$ мм, а толщина и коэффициент теплопроводности первого по ходу теплового потока слоя $\delta_1 = 30$ мм и $\lambda_1 = 3,8$ Вт/(м·К). Линейное термическое сопротивление второго слоя равно $R_{l2} = 0,014$ (м·К)/Вт. Температуры внешних поверхностей стенки $T_{w1} = 550$ °С и $T_{w2} = (30 + 5 \times \underline{3K3})$ °С.

Вариант № 3: Рассчитать линейную тепловую нагрузку q_l через цилиндрическую двухслойную стенку, а также температуру на границе слоев T_{1-2} , если наружный диаметр цилиндра $d_3 = 250$ мм, а толщина и коэффициент теплопроводности второго по ходу теплового потока слоя $\delta_2 = (30 - \underline{3K3})$ мм и $\lambda_2 = 8,6$ Вт/(м·К). Линейное термическое сопротивление первого слоя $R_{l1} = (0,094 + 0,1 \times \underline{3K5})$ (м·К)/Вт. Температуры внешних поверхностей стенки $T_{w1} = 320$ °С и $T_{w2} = 35$ °С.

Вариант № 4: Линейная плотность теплового потока через цилиндрическую двухслойную стенку равна $q_l = 20322$ Вт/м. Внутренний диаметр цилиндра $d_1 = 160$ мм. Толщины слоев и коэффициенты теплопроводности по ходу теплового потока равны $\delta_1 = (20 - \underline{3K4})$ мм; $\delta_2 = 20$ мм; $\lambda_1 = 2,6$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = (5,5 + 0,5 \times \underline{3K5})$ Вт/(м·К). Рассчитать температуры на внешних поверхностях цилиндрической стенки T_{w1} и T_{w2} , если температура в зоне идеального контакта слоев равна $T_{1-2} = 142,7$ °С.

Вариант № 5: Толщины слоев цилиндрической двухслойной стенки и коэффициенты теплопроводности по ходу теплового потока равны $\delta_1 = 20$ мм; $\delta_2 = 10$ мм; $\lambda_1 = (2,2 + 0,6 \times \underline{3K3})$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = 2,3$ Вт/(м·К). Внутренний диаметр цилиндра $d_1 = 140$ мм. Рассчитать температуру на правой границе стенки T_{w2} и температуру в зоне идеального контакта слоев T_{1-2} , если температура на левой

границе $T_{w1} = (440 - 15 \times \underline{3K5})$ °С, а линейная плотность теплового потока $q_l = 15500$ Вм/м.

Вариант № 6: Линейная плотность теплового потока через цилиндрическую двухслойную стенку равна $q_l = (19386 - 100 \times \underline{3K3})$ Вм/м. Внутренний диаметр цилиндра $d_1 = 120$ мм. Толщины слоев по ходу теплового потока равны $\delta_1 = 15$ мм; $\delta_2 = (15 + 2 \times \underline{3K4})$ мм. Коэффициент теплопроводности первого слоя $\lambda_1 = 2,3$ Вм/(м·К). Рассчитать коэффициент теплопроводности второго слоя λ_2 и температуру в зоне идеального контакта слоев T_{1-2} , если температура на внешних границах $T_{w1} = 480$ °С и $T_{w2} = 80$ °С.

Вариант № 7: Линейная плотность теплового потока через цилиндрическую двухслойную стенку равна $q_l = 10305$ Вм/м. Коэффициенты теплопроводности по ходу теплового потока равны $\lambda_1 = 2,4$ Вм/(м·К) и $\lambda_2 = (5,8 - 0,3 \times \underline{3K4})$ Вм/(м·К). Внутренний диаметр цилиндра $d_1 = 60$ мм, а толщина первого слоя $\delta_1 = 15$ мм. Рассчитать толщину второго слоя δ_2 и температуру в зоне идеального контакта слоев T_{1-2} , если температура на внешних границах $T_{w1} = (530 - 10 \times \underline{3K3})$ °С и $T_{w2} = 90$ °С.

Вариант № 8: Линейная плотность теплового потока через цилиндрическую двухслойную стенку равна $q_l = 2224$ Вм/м. Внутренний диаметр цилиндра $d_1 = (70 + 10 \times \underline{3K5})$ мм. Толщины слоев по ходу теплового потока равны $\delta_1 = 15$ мм; $\delta_2 = 50$ мм. Коэффициент теплопроводности второго слоя $\lambda_2 = (9,1 - 0,5 \times \underline{3K3})$ Вм/(м·К). Рассчитать коэффициент теплопроводности первого слоя λ_1 и температуру на правой границе цилиндрической стенки T_{w2} , если температура на левой границе $T_{w1} = 500$ °С, а температура в зоне идеального контакта слоев $T_{1-2} = 130,3$ °С.

Вариант № 9: Линейная плотность теплового потока через цилиндрическую двухслойную стенку равна $q_l = 4432 \text{ Вт/м}$. Толщина второго слоя $\delta_2 = 30 \text{ мм}$. Наружный диаметр цилиндра $d_3 = (420 - 20 \times \underline{3K3}) \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности по ходу теплового потока равны $\lambda_1 = 2,6 \text{ Вт/(м·К)}$ и $\lambda_2 = (7,5 - 0,2 \times \underline{3K4}) \text{ Вт/(м·К)}$. Рассчитать толщину первого слоя δ_1 и температуру на правой границе цилиндрической стенки T_{w2} , если температура на левой границе $T_{w1} = 360 \text{ °C}$, а температура в зоне идеального контакта слоев $T_{1-2} = 110,3 \text{ °C}$.

Задача № 3 (тема «Конвективный теплообмен»)

Вариант № 0: Определить тепловой поток, характеризующий конвективную теплоотдачу, от горизонтальной плиты шириной $a = (0,5 + 0,5 \times \underline{3K3}) \text{ м}$ и длиной $b = 3 \text{ м}$, если теплоотдающая поверхность обращена вниз и температура ее $T_w = (40 + 10 \times \underline{3K4}) \text{ °C}$, а температура воздуха вдали от плиты $T_f = 15 \text{ °C}$.

Вариант № 1: По каналу прямоугольного сечения $a \times b = 3 \times 90 \text{ мм}$ длиной $\ell = 3 \text{ м}$ протекает вода со скоростью $w = (0,5 + 0,2 \times \underline{3K5}) \text{ м/с}$. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от стенок канала к воде, если средняя температура воды по длине канала $T_f = 20 \text{ °C}$, а средняя температура стенок по длине канала $T_w = (50 + 5 \times \underline{3K3}) \text{ °C}$.

Вариант № 2: Пластина длиной $\ell = 1,5 \text{ м}$ и шириной $b = 1 \text{ м}$ омывается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока соответственно равны $w = (4 + 0,5 \times \underline{3K4}) \text{ м/с}$ и $T_f = 20 \text{ °C}$, температура поверхности пластины $T_w = (45 + 3 \times \underline{3K5}) \text{ °C}$. Определить средний коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, переданный от пластины воздуху.

Вариант № 3: Трансформаторное масло омывает трубу диаметром $d = 30$ мм под углом атаки $\varphi = (10 \times \underline{3K4})^\circ$ со скоростью $w = 1$ м/с, температура стенки трубы $T_w = 20$ °С, температура трансформаторного масла $T_f = (50 + 5 \times \underline{3K3})$ °С. Определить коэффициент теплоотдачи от масла к стенке трубы и тепловой поток на единицу длины трубы.

Вариант № 4: Определить тепловой поток, характеризующий конвективную теплоотдачу от воздуха, протекающего со скоростью $w = 2,25$ м/с по каналу круглого сечения диаметром $d = (50 + 5 \times \underline{3K5})$ мм длиной $\ell = 3$ м. Средняя температура воздуха равна $T_f = (20 + 5 \times \underline{3K3})$ °С, температура стенок канала равна $T_w = -5$ °С.

Вариант № 5: Определить тепловой поток, характеризующий конвективную теплоотдачу от поверхности вертикальной стенки высотой $h = (1,7 + 0,3 \times \underline{3K3})$ м при ширине $b = 10$ м к воздуху. Средняя температура воздуха равна $T_f = 10$ °С, температура поверхности стенки равна $T_w = (45 + 5 \times \underline{3K4})$ °С.

Вариант № 6: Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при течении воздуха в горизонтальной трубе диаметром $d = 40$ мм и длиной $\ell = 3$ м, если скорость воздуха $w = (5 + 0,5 \times \underline{3K3})$ м/с, температура $T_f = 20$ °С, температура поверхности стенки трубы $T_w = (50 + 5 \times \underline{3K5})$ °С.

Вариант № 7: Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при течении воды в горизонтальной трубе диаметром $d = (45 + 5 \times \underline{3K3})$ мм и длиной $\ell = 6$ м, если скорость воды $w = (0,5 + 0,2 \times \underline{3K5})$ м/с, температура $T_f = 80$ °С, температура стенки трубы $T_w = 20$ °С.

Вариант № 8: Определить тепловой поток, характеризующий конвективную теплоотдачу от поверхности горизонтальной трубы длиной $\ell = 1$ м и диаметром $d = (0,14 - 0,01 \times \underline{3K4})$ м. Температура поверхности трубы $T_w = -5$ °С, температура воздуха $T_f = (10 + 10 \times \underline{3K3})$ °С.

Вариант № 9: Определить тепловой поток, характеризующий конвективную теплоотдачу от воды, протекающей со скоростью $w = (0,5 + 0,2 \times \underline{3K5})$ м/с по каналу прямоугольного сечения $a \times b = 75 \times 85$ мм длиной $\ell = 3$ м. Средняя температура воды равна $T_f = 90$ °С, температура стенок канала равна $T_w = (20 + 5 \times \underline{3K5})$ °С.

Задача № 4 (тема «Конвективный теплообмен при фазовых превращениях»)

Вариант № 0: В горизонтальном конденсаторе необходимо сконденсировать $G = (700 + 100 \times \underline{3K3})$ кг/ч сухого насыщенного водяного пара при давлении $p_n = 1,013$ бар. Конденсация происходит на трубах длиной $\ell = 3,5$ м и наружным диаметром $d = 30$ мм. Температура стенок труб $T_w = (30 + 5 \times \underline{3K5})$ °С. Какое количество труб необходимо для конденсации пара при условии, что конденсат не переохлаждается и пар неподвижен?

Вариант № 1: Определить, какое количество сухого насыщенного водяного пара сконденсируется в течение часа при пленочной конденсации на вертикальной трубе высотой $h = (2 + 0,2 \times \underline{3K4})$ м, диаметром $d = 45$ мм. Давление конденсации $p_n = 10,03$ бар. Температура стенки $T_w = (150 + 2 \times \underline{3K3})$ °С.

Вариант № 2: Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, переданный стенке при пленочной конденсации сухого насыщенного водяного пара на поверхно-

сти вертикальной трубы высотой $h = (2 + 0,3 \times \underline{3K5})$ м и диаметром $d = 50$ мм, если давление пара $p_n = 2,7012$ бар, температура поверхности трубы $T_w = (50 + 5 \times \underline{3K3})$ °С.

Вариант № 3: Определить количество теплоты, передаваемой конденсирующимся водяным паром при давлении $p_n = 4$ кПа горизонтальной трубе диаметром $d = 22$ мм и длиной $\ell = (2 + 0,2 \times \underline{3K4})$ м при температуре поверхности трубы $T_w = (5 + 2 \times \underline{3K3})$ °С.

Вариант № 4: Найти тепловой поток от наружной поверхности вертикальной пластины высотой $h = 2$ м и длиной $\ell = (1,5 + 0,2 \times \underline{3K5})$ м. На поверхности пластины происходит пленочное кипение воды. Температура насыщения равна $T_n = 130$ °С, а температура поверхности трубы $T_w = (300 + 10 \times \underline{3K3})$ °С.

Вариант № 5: Определить плотность теплового потока на поверхности вертикальной трубы наружным диаметром $d = 20$ мм и высотой $h = (500 + 100 \times \underline{3K3})$ мм, где происходит пленочное кипение воды при давлении $p_n = 0,143$ МПа. Температура стенки трубы $T_w = (350 + 10 \times \underline{3K4})$ °С.

Вариант № 6: Определить количество сухого насыщенного водяного пара, получаемого с поверхности нагрева площадью $F = (2,5 + 0,3 \times \underline{3K3})$ м² при пузырьковом кипении воды в большом объеме, если манометр на испарителе показывает давление $p_m = 2,22$ МПа, а перегрев воды составляет $\Delta T = T_w - T_n = (7 + 0,5 \times \underline{3K5})$ °С.

Вариант № 7: Вода в большом объеме кипит на трубах испарителя, имеющих на поверхности температуру $T_w = (175 + \underline{3K4})$ °С. Давление воды равно $p_n = 0,792$ МПа, наружный диаметр труб $d = 40$ мм, длина $\ell = 1,3$ м, количество труб $n = (50 + 10 \times \underline{3K3})$ шт. Найти коэффициент

теплоотдачи при пузырьковом режиме кипения и тепловой поток от труб к воде.

Вариант № 8: Вода под давлением $p_n = (1 + 0,1 \times \underline{3K3})$ МПа кипит в большом объеме на плоской поверхности. Плотность теплового потока, подводимого к воде, $q = (1 + 0,1 \times \underline{3K5})$ МВт/м². Рассчитать коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении воды в большом объеме и температуру поверхности.

Вариант № 9: Найти коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при пленочном режиме кипения воды на наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром $d = (10 + 2 \times \underline{3K4})$ мм и длиной $\ell = 0,8$ м при давлении пара $p_n = 0,198$ МПа. Температура стенки трубы равна $T_w = (300 + 10 \times \underline{3K4})$ °С.

Задача № 5 (тема «Теплообмен излучением»)

Вариант № 0: В помещении большого объема находится стальная неизолированная труба, по которой протекает горячая вода. Наружный диаметр трубы $d = (30 + 5 \times \underline{3K5})$ мм. Температура наружной поверхности трубы $T_1 = (90 + 10 \times \underline{3K3})$ °С. Температура стен помещения $T_2 = 20$ °С. Коэффициент излучения для стальной поверхности трубы $c_1 = 4,5$ Вт/(м²·К⁴). Определить потерю теплоты излучением с 1 погонного метра трубы.

Вариант № 1: Определить долю теплоотдачи излучением в составе суммарной (конвекция и излучение) теплоотдачи при нагревании помещения с температурой $T_2 = 25$ °С радиатором водяного отопления. Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции $\alpha = (5 + \underline{3K3})$ Вт/(м²·К). Температура поверхности радиатора $T_1 = (45 + 5 \times \underline{3K5})$ °С, степень черноты радиатора $\varepsilon_1 = 0,75$.

Вариант № 2: Стальной брус нагревается в электропечи. Температура внутренней поверхности печи $T_1 = (450 + 50 \times \underline{3K3})$ °C, степень черноты $\varepsilon_1 = (0,8 + 0,01 \times \underline{3K4})$. Температура поверхности бруска $T_2 = 350$ °C, степень черноты $\varepsilon_2 = 0,65$. Заготовка лежит на поду печи. Площадь излучающей поверхности бруска меньше внутренней излучающей поверхности печи в 4 раза. Определить плотность результирующего лучистого потока от стенок печи на поверхность бруса.

Вариант № 3: Определить плотность результирующего теплового потока, при теплообмене излучением двух плоских поверхностей, если температура одной поверхности $T_1 = (420 + 50 \times \underline{3K5})$ °C и степень ее черноты $\varepsilon_1 = 0,8$, а температура второй поверхности $T_2 = 300$ °C и степень черноты $\varepsilon_2 = (0,4 + 0,05 \times \underline{3K3})$.

Вариант № 4: Определить тепловой поток излучением от стальной неизолированной окисленной трубы длиной $l = 6$ м с наружным диаметром $d = 0,1$ м, находящейся в канале, площадь поверхности которого $F_2 = 20$ м². Температура наружной поверхности трубы $T_1 = (45 + 5 \times \underline{3K5})$ °C, температура стенок канала $T_2 = 15$ °C. Степень черноты поверхности трубы $\varepsilon_1 = (0,8 + 0,01 \times \underline{3K3})$ и поверхности стенок канала $\varepsilon_2 = 0,62$.

Вариант № 5: Определить плотность теплового потока излучением с 1 м² поверхности радиатора отопления в окружающую среду с температурой $T_2 = 15$ °C, если температура излучаемой поверхности $T_1 = (80 + 5 \times \underline{3K4})$ °C, а ее степень черноты $\varepsilon_1 = (0,7 + 0,02 \times \underline{3K3})$.

Вариант № 6: Стальная труба диаметром $d = 100$ мм находится в кирпичном канале размером $a \times b = 0,3 \times 0,3$ м. Температура поверхности трубы $T_1 = (90 + 5 \times \underline{3K5})$ °C, а степень черноты $\varepsilon_1 = 0,7$. Температура внутренней поверх-

ности кирпичной стенки $T_2 = (20 + 2 \times \underline{3K3})$ °C, степень черноты стенки $\varepsilon_2 = 0,8$. Определить потерю теплоты излучением с 1 погонного метра трубы.

Вариант № 7: Определить результирующий тепловой поток излучением с 1 м трубы, если одна труба с наружным диаметром $d_1 = 80$ мм находится внутри другой с внутренним диаметром $d_2 = 200$ мм. Степени черноты труб одинаковы и равны $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = (0,6 + 0,03 \times \underline{3K3})$. Температура внутренней поверхности наружной трубы равна $T_2 = 100$ °C, температура наружной поверхности внутренней трубы равна $T_1 = (200 + 20 \times \underline{3K4})$ °C.

Вариант № 8: В муфельной печи нагревается металлическая заготовка квадратного сечения $a \times b = 0,2 \times 0,2$ м, длиной $l = 0,8$ м. Заготовка лежит на поду печи. Высота печи $H = 0,6$ м, ширина $B = 0,5$ м, длина $L = 0,8$ м. Температура стенок печи $T_1 = (450 + 50 \times \underline{3K5})$ °C, степень черноты поверхности печи $\varepsilon_1 = 0,7$. Температура металлической заготовки $T_2 = 350$ °C, степень черноты заготовки $\varepsilon_2 = (0,8 + 0,01 \times \underline{3K3})$. Определить плотность результирующего теплового потока от стенок печи к поверхности заготовки.

Вариант № 9: Внутри холодильной камеры с температурой $T_1 = -3$ °C проложен трубопровод, по которому циркулирует холодильный агент. Трубопровод покрыт инеем, на поверхности которого температура равна $T_2 = (-7 - 2 \times \underline{3K4})$ °C. Определить коэффициент теплоотдачи излучением от воздуха к трубе. Степень черноты инея равна $\varepsilon_2 = (0,8 + 0,01 \times \underline{3K3})$.

4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2

Контрольная работа № 2 по дисциплине «Тепломассообмен» (6 семестр) состоит из:

- теоретической части, включающей 5 вопросов, на которые необходимо дать развернутые ответы;
- практической части, включающей 3 задачи.

Выбор варианта заданий для выполнения контрольной работы связан с номером зачетной книжки обучающегося. Номер зачетной книжки студента ИГЭУ совпадает с номером студенческого билета.

Номер зачетной книжки обычно включает шесть цифр. Три первые цифры соответствуют номеру факультета и году поступления в ВУЗ. Например, для студента, поступившего в ИГЭУ в 2022 году, номер зачетной книжки может иметь вид 622997.

В тексте заданий использована следующая индексация:

- ЗК1* – первая цифра номера зачетной книжки;
- ЗК2* – вторая цифра номера зачетной книжки;
- ЗК3* – третья цифра номера зачетной книжки;
- ЗК4* – четвертая цифра номера зачетной книжки;
- ЗК5* – пятая цифра номера зачетной книжки;
- ЗК6* – шестая цифра номера зачетной книжки.

4.1. Теоретическая часть контрольной работы

Вариант задания для выполнения контрольной работы №2 выбирается студентом в соответствии с последней цифрой номера зачетной книжки (студенческого билета) (*ЗК6*).

Вариант № 0

Вопрос 1. Дайте определения понятий: температурное поле, стационарное и нестационарное температурное поле. Приведите примеры записи температурных полей.

Вопрос 2. Сформулируйте основной закон теплопроводности – закон Фурье. Напишите математическое выражение закона и поясните входящие в него величины.

Вопрос 3. Дайте краткую характеристику начальных условий, граничных условия I, II, III и IV рода.

Вопрос 4. Напишите уравнение теплопередачи через плоскую однослойную стенку.

Вопрос 5. Напишите уравнение теплового баланса рекуператора, если горячий теплоноситель – водяной пар, холодный теплоноситель – вода. Поясните входящие в него величины.

Вариант № 1

Вопрос 1. Дайте определение изотермическая поверхность. Перечислите свойства изотермических поверхностей. Изотермические поверхности в телах простой формы.

Вопрос 2. Поясните физический смысл коэффициента теплопроводности. Напишите формулу, лежащую в основе его экспериментального определения. Приведите числовые значения коэффициента теплопроводности для меди, стали, бетона, минеральной ваты и воздуха при нормальных условиях.

Вопрос 3. Изобразите схематично графики распределения температуры, если коэффициент теплопроводности не зависит от температуры в цилиндрической стенке при подводе теплоты извне.

Вопрос 4. Напишите уравнение теплопередачи через плоскую двухслойную стенку.

Вопрос 5. Напишите уравнение теплового баланса рекуператора, если горячий теплоноситель – трансформатор-

ное масло, холодный теплоноситель – воздух. Поясните входящие в него величины.

Вариант № 2

Вопрос 1. Напишите формулу и дайте определение градиента температуры. Градиент температуры в декартовой системе координат.

Вопрос 2. Что характеризует коэффициент теплопроводности. Опишите связь коэффициента теплопроводности с коэффициентом теплопроводности и удельной теплоемкостью.

Вопрос 3. Методы решения краевой задачи теории теплопроводности.

Вопрос 4. Напишите уравнение теплопередачи через плоскую трехслойную стенку.

Вопрос 5. Напишите уравнение теплового баланса рекуператора, если горячий теплоноситель – дымовые газы, холодный теплоноситель – воздух. Поясните входящие в него величины.

Вариант № 3

Вопрос 1. Дайте определения понятий количество теплоты и тепловой поток. Укажите обозначения и единицы измерения этих величин.

Вопрос 2. Дифференциальное уравнение теплопроводности в декартовой системе координат. Напишите математическое выражение и поясните входящие в него величины.

Вопрос 3. Поясните физический смысл коэффициента теплопроводности. Напишите формулу, лежащую в основе его экспериментального определения. Приведите числовые значения коэффициента теплопроводности для меди, стали, бетона, минеральной ваты и воздуха при нормальных условиях.

Вопрос 4. Напишите уравнение теплопередачи через цилиндрическую однослойную стенку.

Вопрос 5. Напишите уравнение теплового баланса рекуператора, если горячий теплоноситель – аммиачный пар, холодный теплоноситель – вода. Поясните входящие в него величины.

Вариант № 4

Вопрос 1. Дайте определения понятий поверхностная, линейная и объемная плотность теплового потока. Укажите обозначения и единицы измерения этих величин.

Вопрос 2. Дифференциальное уравнение теплопроводности для тел простейшей формы. Напишите математическое выражение и поясните входящие в него величины.

Вопрос 3. Перечислите условия однозначности, необходимые для решения дифференциального уравнения теплопроводности.

Вопрос 4. Напишите уравнение теплопередачи через цилиндрическую двухслойную стенку.

Вопрос 5. Напишите уравнение теплового баланса рекуператора, если горячий теплоноситель – масло марки МК, холодный теплоноситель – вода. Поясните входящие в него величины.

Вариант № 5

Вопрос 1. Перечислите и дайте определения элементарных способов передачи теплоты.

Вопрос 2. Дифференциальное уравнение теплопроводности для стационарных процессов. Напишите математическое выражение и поясните входящие в него величины.

Вопрос 3. Что характеризует коэффициент температуропроводности. Опишите связь коэффициента температуропроводности с коэффициентом теплопроводности и удельной теплоемкостью.

Вопрос 4. Напишите уравнение теплопередачи через цилиндрическую трехслойную стенку.

Вопрос 5. Напишите уравнение теплопередачи для теплообменного аппарата. Поясните входящие в него вели-

чины. Укажите сходства и отличия уравнений теплопередачи для теплообменного аппарата и для плоской стенки.

Вариант № 6

Вопрос 1. Какой вид теплообмена называют сложным. Приведите примеры сложного теплообмена. Дайте определения понятий теплоотдача и теплопередача.

Вопрос 2. Перечислите условия однозначности, необходимые для решения дифференциального уравнения теплопроводности.

Вопрос 3. Дифференциальное уравнение теплопроводности для тел простейшей формы. Напишите математическое выражение и поясните входящие в него величины.

Вопрос 4. Напишите уравнение теплопередачи через шаровую однослойную стенку.

Вопрос 5. Расчет средней разности температур в рекуператоре.

Вариант № 7

Вопрос 1. Дайте определения понятий поверхностная, линейная и объемная плотность теплового потока. Укажите обозначения и единицы измерения этих величин.

Вопрос 2. Дайте краткую характеристику начальных условий, граничных условия I, II, III и IV рода.

Вопрос 3. Расчет температурных полей тел простейшей формы по номограммам. Прямая и обратная постановка задачи. Критерии Fo и Bi .

Вопрос 4. Напишите уравнение теплопередачи через шаровую двухслойную стенку.

Вопрос 5. Напишите уравнение теплового баланса рекуператора, если горячий теплоноситель – водяной пар, холодный теплоноситель – вода. Поясните входящие в него величины.

Вариант № 8

Вопрос 1. Какой вид теплообмена называют сложным. Приведите примеры сложного теплообмена. Дайте определения понятий теплоотдача и теплопередача.

Вопрос 2. Методы решения краевой задачи теории теплопроводности.

Вопрос 3. Опишите алгоритм расчета нестационарной теплопроводности в телах простейшей формы по номограммам при обратной постановке задачи.

Вопрос 4. Напишите уравнение теплопередачи через шаровую трехслойную стенку.

Вопрос 5. Напишите уравнение теплового баланса рекуператора, если горячий теплоноситель – трансформаторное масло, холодный теплоноситель – воздух. Поясните входящие в него величины.

Вариант № 9

Вопрос 1. Дайте определения понятий количество теплоты и тепловой поток. Укажите обозначения и единицы измерения этих величин.

Вопрос 2. Расчет температурных полей тел простейшей формы по номограммам. Прямая и обратная постановка задачи. Критерии Fo и Bi .

Вопрос 3. Сформулируйте основной закон теплопроводности – закон Фурье. Напишите математическое выражение закона и поясните входящие в него величины.

Вопрос 4. Напишите выражение для определения термического сопротивления теплопередачи через плоскую однослойную стенку.

Вопрос 5. Напишите уравнение теплового баланса рекуператора, если горячий теплоноситель – дымовые газы, холодный теплоноситель – воздух. Поясните входящие в него величины.

4.2. Практическая часть контрольной работы

Вариант задания в каждой из тем («Стационарная теплопередача» и «Теплообменные аппараты») выбирается студентом по последней цифре номера зачетной книжки (студенческого билета).

Задача № 1 (тема «Стационарная теплопередача через плоскую стенку»)

Вариант № 0: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 9000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = (100 + 5 \times \underline{3\text{К}5}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура на границе 1-го и 2-го слоев $T_{1-2} = 745,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Плотность теплового потока, проходящего через стенку в стационарном режиме теплообмена $q = 195,2 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Толщины слоев: $\delta_1 = (250 - 10 \times \underline{3\text{К}3}) \text{ мм}$, $\delta_2 = 190 \text{ мм}$, $\delta_3 = 100 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 2 \text{ м}^2$;

в) температуры T_{f1} , T_{w1} , T_{2-3} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

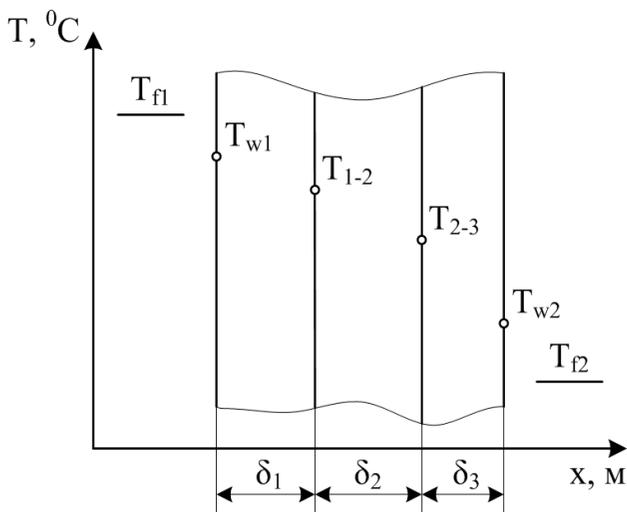


Рис. 1. Принципиальное изображение трехслойной плоской стенки

Вариант № 1: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (см. рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = (110 + 10 \times \underline{3К3}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура на поверхности стенки со стороны горячего теплоносителя $T_{w1} = 919,9 \text{ }^\circ\text{С}$. Температура на поверхности стенки со стороны холодного теплоносителя $T_{w2} = 241,0 \text{ }^\circ\text{С}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 250 \text{ мм}$, $\delta_2 = 180 \text{ мм}$, $\delta_3 = (70 + 10 \times \underline{3К4}) \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи

от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 4 \text{ м}^2$;

в) температуры T_{f1} , T_{1-2} , T_{2-3} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 2: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (см. рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = (2000 + 500 \times \underline{3K3}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 320 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура на границе 1-го и 2-го слоев $T_{1-2} = 935,6 \text{ }^\circ\text{С}$. Температура холодного теплоносителя $T_{f2} = 300,0 \text{ }^\circ\text{С}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 250 \text{ мм}$, $\delta_2 = 150 \text{ мм}$, $\delta_3 = 130 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = (0,08 + 0,3 \times \underline{3K5}) \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 8 \text{ м}^2$;

в) температуры T_{f1} , T_{w1} , T_{2-3} , T_{w2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 3: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (см. рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от поверхности стенки к холодному теплоносителю $\alpha_2 = (50 + 5 \times \underline{3K4}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Температура горячего теплоносителя $T_{f1} = (500 + 10 \times \underline{3K3})$ °С. Температура на границе 1-го и 2-го слоев $T_{1-2} = (450 + 10 \times \underline{3K3})$ °С. Толщины слоев: $\delta_1 = 100$ мм, $\delta_2 = 250$ мм, $\delta_3 = 50$ мм. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,9$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 0,08$ Вт/(м·К), $\lambda_3 = 15$ Вт/(м·К).

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 5$ м²;

в) температуры T_{w1} , T_{2-3} , T_{w1} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 4: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (см. рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = (3000 - 150 \times \underline{3K5})$ Вт/(м²·К), а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 250$ Вт/(м²·К). Температура холодного теплоносителя $T_{f2} = 150,0$ °С. Плотность теплового потока, проходящего через стенку в стационарном режиме теплопередачи $q = 153,5$ Вт/м². Толщины слоев: $\delta_1 = (250 - 10 \times \underline{3K3})$ мм, $\delta_2 = 265$ мм, $\delta_3 = 135$ мм. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,9$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 0,08$ Вт/(м·К), $\lambda_3 = 0,15$ Вт/(м·К).

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 6 \text{ м}^2$;

в) температуры T_{f1} , T_{w1} , T_{1-2} , T_{2-3} , T_{w2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 5: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (см. рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 350 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура горячего теплоносителя $T_{f1} = (1030 - 20 \times 3\text{К}3) \text{ }^\circ\text{С}$. Температура на поверхности стенки со стороны холодного теплоносителя $T_{w2} = 320,5 \text{ }^\circ\text{С}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 250 \text{ мм}$, $\delta_2 = (240 - 10 \times 3\text{К}4) \text{ мм}$, $\delta_3 = 140 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 7 \text{ м}^2$;

в) температуры T_{f1} , T_{1-2} , T_{2-3} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 6: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (см. рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = (1000 + 100 \times 3\text{К}5) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура горячего теплоносителя $T_{f1} = 960,0 \text{ }^\circ\text{С}$. Температура на границе 2-го и 3-го слоев

$T_{2-3} = 320,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Толщины слоев: $\delta_1 = (250 - 10 \times \underline{3K3}) \text{ мм}$, $\delta_2 = 195 \text{ мм}$, $\delta_3 = 155 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_2 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_3 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 12 \text{ м}^2$;

в) температуры T_{w1} , T_{1-2} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 7: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (см. рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 3500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Температура горячего теплоносителя $T_{f1} = (500 + 50 \times \underline{3K3}) \text{ }^\circ\text{C}$. Температура на поверхности со стороны холодного теплоносителя $T_{w2} = 280,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 250 \text{ мм}$, $\delta_2 = 270 \text{ мм}$, $\delta_3 = 165 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = (0,9 + 0,1 \times \underline{3K4}) \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_2 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_3 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 10 \text{ м}^2$;

в) температуры T_{f1} , T_{w1} , T_{1-2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 8: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (см. рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = (6000 - 500 \times \underline{3K3}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура на поверхности со стороны горячего теплоносителя $T_{w1} = (800 - 40 \times \underline{3K5}) \text{ }^\circ\text{С}$. Температура холодного теплоносителя $T_{f2} = 250 \text{ }^\circ\text{С}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 250 \text{ мм}$, $\delta_2 = 220 \text{ мм}$, $\delta_3 = 170 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 3 \text{ м}^2$;

в) температуры T_{f1} , T_{1-2} , T_{2-3} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 9: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную плоскую стенку (см. рис. 1). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура на границе 1-го и 2-го слоев $T_{1-2} = 450 \text{ }^\circ\text{С}$. Температура на границе 2-го и 3-го слоев $T_{2-3} = 200 \text{ }^\circ\text{С}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 250 \text{ мм}$, $\delta_2 = (300 - 20 \times \underline{3K4}) \text{ мм}$, $\delta_3 = 130 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев:

$$\lambda_1 = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}), \quad \lambda_2 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}),$$

$$\lambda_3 = (0,15 + 0,02 \times \underline{3К3}) \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Определить:

а) термические сопротивления теплопроводности слоев плоской стенки и термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через плоскую стенку площадью $F = 9 \text{ м}^2$;

в) температуры T_{f1} , T_{w1} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев плоской стенки и в пограничных слоях.

Задача № 2 (тема «Стационарная теплопередача через цилиндрическую стенку»)

Вариант № 0: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (рис. 2). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = (5000 - 200 \times \underline{3К4}) \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 350 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Температура поверхности стенки со стороны горячего теплоносителя $T_{w1} = 620 \text{ }^\circ\text{С}$. Температура на границе 2-го и 3-го слоев стенки $T_{2-3} = 320 \text{ }^\circ\text{С}$. Внутренний диаметр $d_1 = 44 \text{ мм}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 2,5 \text{ мм}$, $\delta_2 = 10 \text{ мм}$, $\delta_3 = (1,5 - 0,1 \times \underline{3К3}) \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_2 = 40 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_3 = 0,09 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 2 \text{ м}$;

в) температуры T_{f1} , T_{1-2} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

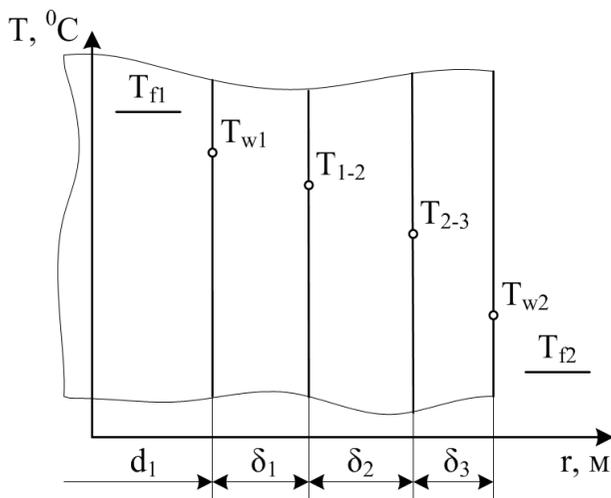


Рис. 2. Принципиальное изображение трехслойной цилиндрической стенки

Вариант № 1: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (см. рис. 2). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = (1500 + 200 \times 3K3) \text{ Bm}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 150 \text{ Bm}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Температура горячего теплоносителя $T_{f1} = 980 \text{ }^\circ\text{C}$. Линейная плотность теплового потока, проходящего через цилиндрическую стенку в стационарном режиме теплообмена $q_l = (2412 - 52 \times 3K5) \text{ Bm}/\text{m}$. Внутренний диаметр $d_1 = 34 \text{ мм}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 2,5 \text{ мм}$, $\delta_2 = 6 \text{ мм}$, $\delta_3 = 1,5 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,15 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_2 = 25 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_3 = 0,07 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 3 \text{ м}$;

в) температуры T_{w1} , T_{1-2} , T_{2-3} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 2: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (см. рис. 2). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 3500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура поверхности со стороны горячего теплоносителя $T_{w1} = 452 \text{ }^\circ\text{С}$. Линейная плотность теплового потока, проходящего через цилиндрическую стенку в стационарном режиме, $q_l = 2675 \text{ Вт}/\text{м}$. Внутренний диаметр $d_1 = (56 - \underline{3К4}) \text{ мм}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 2,5 \text{ мм}$, $\delta_2 = 6 \text{ мм}$, $\delta_3 = 1,5 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = (0,09 + 0,01 \times \underline{3К3}) \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 4 \text{ м}$;

в) температуры T_{w1} , T_{1-2} , T_{2-3} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 3: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (см. рис. 2). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 6000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от поверхности последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = (120 + 20 \times \underline{3\text{К}5}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура на границе 1-го и 2-го слоев $T_{1-2} = (652 - 15 \times \underline{3\text{К}4}) \text{ }^\circ\text{С}$. Линейная плотность теплового потока, проходящего через цилиндрическую стенку в стационарном режиме теплообмена $q_l = 3642 \text{ Вт}/\text{м}$. Внутренний диаметр $d_1 = 46 \text{ мм}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 2,5 \text{ мм}$, $\delta_2 = 9 \text{ мм}$, $\delta_3 = 1,5 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 5 \text{ м}$;

в) температуры T_{f1} , T_{w1} , T_{2-3} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 4: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (см. рис. 2). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = (1500 + 125 \times \underline{3\text{К}3}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от поверхности последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура горячего теплоносителя

ля $T_{f1} = 900$ °С. Температура поверхности со стороны холодного теплоносителя $T_{w2} = 261$ °С. Внутренний диаметр $d_1 = 35$ мм. Толщины слоев: $\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7$ мм, $\delta_3 = (1,0 + 0,3 \times \underline{3K4})$ мм. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,1$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 35$ Вт/(м·К), $\lambda_3 = 0,07$ Вт/(м·К).

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 6$ м;

в) температуры T_{w1} , T_{1-2} , T_{2-3} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 5: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (см. рис. 2). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 1200$ Вт/(м²·К), а от поверхности последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 170$ Вт/(м²·К). Температура на границе 1-го и 2-го слоев $T_{1-2} = 575$ °С. Температура холодного теплоносителя $T_{f2} = (130 + 10 \times \underline{3K4})$ °С. Внутренний диаметр $d_1 = (28 + 3 \times \underline{3K5})$ мм. Толщины слоев: $\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 4$ мм, $\delta_3 = 1,5$ мм. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,15$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 40$ Вт/(м·К), $\lambda_3 = 0,07$ Вт/(м·К).

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические

ские сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 7 \text{ м}$;

в) температуры T_{f1} , T_{w1} , T_{2-3} , T_{w2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 6: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (см. рис. 2). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 8000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от поверхности последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = (200 + 10 \times \underline{3\text{К}5}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура стенки со стороны горячего теплоносителя $T_{w1} = 813,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура на границе 1-го и 2-го слоев $T_{1-2} = 512 \text{ }^\circ\text{C}$. Внутренний диаметр $d_1 = 26 \text{ мм}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 1,5 \text{ мм}$, $\delta_2 = 4,5 \text{ мм}$, $\delta_3 = 1,5 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 37 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = (0,08 + 0,01 \times \underline{3\text{К}4}) \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 8 \text{ м}$;

в) температуры T_{f1} , T_{2-3} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 7: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (см. рис. 2). Ко-

коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = (1500 + 500 \times \underline{3K5}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от поверхности последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 180 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура стенки со стороны горячего теплоносителя $T_{w1} = (950 - 30 \times \underline{3K3}) \text{ }^\circ\text{С}$. Температура холодного теплоносителя $T_{f2} = 120 \text{ }^\circ\text{С}$. Внутренний диаметр $d_1 = 24 \text{ мм}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 2,5 \text{ мм}$, $\delta_2 = 5 \text{ мм}$, $\delta_3 = 1,5 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 9 \text{ м}$;

в) температуры T_{f1} , T_{1-2} , T_{2-3} , T_{w2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 8: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (см. рис. 2). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = 2300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от поверхности последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = (150 + 10 \times \underline{3K5}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура горячего теплоносителя $T_{f1} = 890 \text{ }^\circ\text{С}$. Температура на границе 2-го и 3-го слоев стенки $T_{2-3} = 578 \text{ }^\circ\text{С}$. Внутренний диаметр $d_1 = 22 \text{ мм}$. Толщины слоев: $\delta_1 = 2,5 \text{ мм}$, $\delta_2 = 6 \text{ мм}$, $\delta_3 = 1,5 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = (0,1 + 0,02 \times \underline{3K4}) \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 10 \text{ м}$;

в) температуры T_{w1} , T_{1-2} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

Вариант № 9: Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку (см. рис. 2). Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности первого слоя стенки $\alpha_1 = (2500 - 100 \times \underline{3K3}) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от поверхности последнего слоя к холодному теплоносителю $\alpha_2 = 190 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура горячего теплоносителя $T_{f1} = 890 \text{ }^\circ\text{С}$. Температура стенки со стороны горячего теплоносителя $T_{w1} = 880 \text{ }^\circ\text{С}$. Внутренний диаметр $d_1 = 25 \text{ мм}$. Толщины слоев: $\delta_1 = (2,5 - 0,1 \times \underline{3K4}) \text{ мм}$, $\delta_2 = 5 \text{ мм}$, $\delta_3 = 1,5 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности слоев: $\lambda_1 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_2 = 35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_3 = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить:

а) линейные термические сопротивления теплопроводности слоев цилиндрической стенки и линейные термические сопротивления теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю;

б) тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной $\ell = 11 \text{ м}$;

в) температуры T_{w1} , T_{1-2} , T_{w2} , T_{f2} .

Изобразить в масштабе график изменения температур по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях.

Задача № 3 (тема «Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата»)

Вариант № 0: Определить площадь поверхности нагрева рекуперативного газо-воздушного теплообменного аппарата при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей, если объемный расход нагреваемого воздуха $V_2 = (15000 + 1000 \times \underline{3K3}) \text{ м}^3/\text{ч}$, средний коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к воздуху $k = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температуры горячего и холодного теплоносителей на входе и на выходе из теплообменника соответственно $T_1' = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_1'' = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2' = (30 + 5 \times \underline{3K4}) \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2'' = 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Изобразить график изменения температур теплоносителей для обоих случаев. Определить расход продуктов сгорания топлива в $\text{кг}/\text{с}$, приняв их плотность и теплоемкость соответственно равными $\rho_1 = 0,748 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $c_{p2} = 1,097 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Вариант № 1: Определить площадь поверхности нагрева рекуперативного водо-воздушного теплообменного аппарата при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей, если объемный расход воздуха $V_1 = (1500 + 500 \times \underline{3K5}) \text{ м}^3/\text{ч}$, средний коэффициент теплопередачи от воздуха к воде $k = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, начальные и конечные температуры воздуха и воды соответственно $T_1' = (500 - 20 \times \underline{3K4}) \text{ }^\circ\text{C}$, $T_1'' = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2' = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2'' = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить также расход нагреваемой в теплообменнике воды. Изобразить график изменения температур теплоносителей для обоих случаев.

Вариант № 2: Определить площадь поверхности теплообмена конденсатора турбины и количество циркуляционной воды с начальной температурой $T_2' = (5 + 0,5 \times \underline{3K4}) \text{ }^\circ\text{C}$, если весь пар в количестве $G_1 = 2 \text{ т}/\text{ч}$ переходит в конденсат, покидающий теплообменник при температуре насыщения. Давление в конденсаторе $p_1 = 4 \text{ кПа}$.

Коэффициент теплопередачи $k = (3,2 + 0,2 \times \underline{3K3}) \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, количество циркуляционной воды $G_2 = 20 \text{ кг}/\text{с}$. Рассчитать также температуру воды на выходе из конденсатора.

Вариант № 3: Определить требуемую площадь поверхности теплообмена рекуперативного теплообменного аппарата, в котором вода нагревается горячими уходящими газами. Расчет произвести для прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей. Значения температур газов и нагреваемой воды соответственно $T_1' = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_1'' = (150 + 10 \times \underline{3K3}) \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2' = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2'' = 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Расход воды $G_2 = (0,6 + 0,1 \times \underline{3K4}) \text{ кг}/\text{с}$. Коэффициент теплопередачи $k = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Изобразить график изменения температур теплоносителей для обоих случаев.

Вариант № 4: Определить тепловую мощность и требуемую площадь поверхности теплообмена противоточного рекуперативного теплообменного аппарата, предназначенного для охлаждения $G_1 = (0,6 + 0,1 \times \underline{3K3}) \text{ кг}/\text{с}$ трансформаторного масла от $T_1' = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ до $T_1'' = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве холодного теплоносителя используют воду с начальной температурой $T_2' = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ и расходом $G_2 = (0,65 + 0,1 \times \underline{3K5}) \text{ кг}/\text{с}$. Коэффициент теплопередачи $k = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Рассчитать температуру воды на выходе из теплообменного аппарата. Изобразить график изменения температур теплоносителей в теплообменнике.

Вариант № 5: Определить тепловую мощность и требуемую площадь поверхности теплообмена рекуперативного теплообменного аппарата, предназначенного для подогрева воздуха давлением $p_2 = 1 \text{ бар}$ в количестве $V_2 = 2,5 \text{ м}^3/\text{с}$ от $T_2' = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ до $T_2'' = (60 + 3 \times \underline{3K4}) \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве греющего теплоносителя используют воду с начальной температурой $T_1' = 95 \text{ }^\circ\text{C}$ и расходом $G_1 = (2 + \underline{3K3}) \text{ кг}/\text{с}$. Коэффициент теплопередачи $k = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Расчет выполнить для прямоточной и противоточной схем движе-

ния теплоносителей. Изобразить график изменения температур теплоносителей для обоих случаев.

Вариант № 6: Определить требуемую площадь поверхности теплообмена рекуперативного водо-водяного теплообменного аппарата, а также расход горячего теплоносителя. Расчет выполнить для прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей. Значения температур греющей и нагреваемой воды соответственно $T_1' = 100$ °C, $T_1'' = (60 + \underline{3K3})$ °C, $T_2' = (8 + 2 \times \underline{3K5})$ °C, $T_2'' = 55$ °C. Расход нагреваемой воды $G_2 = 20$ кг/с. Коэффициент теплопередачи $k = 2700$ Вт/(м²·K). Изобразить график изменения температур теплоносителей для обоих случаев.

Вариант № 7: Определить тепловую мощность и требуемую площадь поверхности теплообмена рекуперативного теплообменного аппарата, предназначенного для конденсации сухого насыщенного водяного пара давлением $p_1 = (4 + 0,2 \times \underline{3K4})$ бар и расходом $G_1 = (1 + 0,15 \times \underline{3K5})$ кг/с. В качестве холодного теплоносителя используют воду в количестве $G_2 = 10$ кг/с с начальной температурой $T_2' = 15$ °C. Коэффициент теплопередачи $k = 3500$ Вт/(м²·K).

Вариант № 8: Определить тепловую мощность и требуемую площадь поверхности теплообмена противоточного рекуперативного теплообменного аппарата, предназначенного для охлаждения $G_1 = (1 + 0,1 \times \underline{3K5})$ кг/с трансформаторного масла от $T_1' = 90$ °C до $T_1'' = 45$ °C. В качестве холодного теплоносителя используют воздух с начальной температурой $T_2' = (5 + \underline{3K3})$ °C и расходом $G_2 = 2,2$ кг/с. Коэффициент теплопередачи $k = 75$ Вт/(м²·K). Изобразить график изменения температур теплоносителей в теплообменнике.

Вариант № 9: Определить площадь поверхности теплообмена и тепловую мощность испарителя, в котором в

качестве греющего теплоносителя используют воду температурой $T_1' = 180\text{ }^\circ\text{C}$ в количестве $G_1 = 25\text{ м/ч}$. Расход вторичного водяного пара $G_2 = (600 + 100 \times 3K4)\text{ кг/ч}$, давление $p_2 = (4 - 0,3 \times 3K3)\text{ бар}$, степень сухости $x_2 = 1$. Коэффициент теплопередачи $k = 5,5\text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Изобразить график изменения температур теплоносителей в теплообменном аппарате.

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1

В контрольную работу включены вопросы и задачи, рассматривающие перенос теплоты при теплопроводности (задачи №1 и №2), конвективном теплообмене (задачи №3 и №4) и теплообмене излучением (задача №5).

Более подробно основные положения теории тепло-массообмена изложены в литературе [1, 2, 5–7].

Ниже приведены примеры решения типовых задач по изучаемым темам.

5.1. Примеры решения задач по темам «Стационарная теплопроводность в плоской стенке» и «Стационарная теплопроводность в цилиндрической стенке» (задачи №1 и 2)

Задача №1 (тема «Стационарная теплопроводность в плоской стенке»)

Рассчитать тепловые потери через 1 м^2 двухслойной плоской стенки температуру на границе соприкосновения слоёв, если толщина и коэффициент теплопроводности первого слоя стенки $\delta_1 = 250\text{ мм}$ и $\lambda_1 = 0,165\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, толщина и коэффициент теплопроводности второго слоя стенки $\delta_2 = 100\text{ мм}$ и $\lambda_2 = 0,77\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Температура на внутренней поверхности $T_{w1} = 705\text{ }^\circ\text{C}$, а на наружной – $T_{w2} = 90\text{ }^\circ\text{C}$.

Дано:

$\delta_1 = 250 \text{ мм}; \delta_2 = 100 \text{ мм}; \lambda_1 = 0,165 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$

$\lambda_2 = 0,77 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); T_{w1} = 705 \text{ }^\circ\text{C}; T_{w2} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

Найти: $q_\ell; T_{1-2}$

Решение:

В координатах (T, x) изобразим плоскую двухслойную стенку и температурное поле в процессе теплопроводности (рис. 3). Отметим на рисунке известные по условию задачи величины.

Решение прямой задачи выполняем по алгоритму, изложенному в разделе 2.4.4 пособия [1] (стр. 65).

1. Рассчитываем термические сопротивления теплопроводности всех слоев стенки:

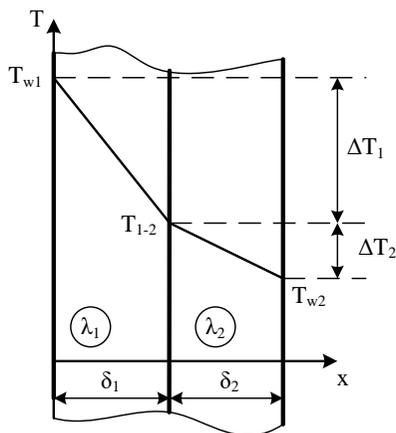


Рис. 3. Стационарное температурное поле в плоской двухслойной стенке

– первого слоя:

$$R_{t1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{0,25}{0,165} = 1,515 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт};$$

– второго слоя:

$$R_{t2} = \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0,1}{0,77} = 0,1299 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт.}$$

2. Находим поверхностную плотность теплового потока по двум заданным температурам и сумме термических сопротивлений участков между этими температурами:

$$q = \frac{(T_{w1} - T_{w2})}{R_{t1} + R_{t2}} = \frac{705 - 90}{1,515 + 0,1299} = 373,9 \text{ Вт/м}^2.$$

3. Определяем неизвестную температуру на границе соприкосновения слоев стенки. Для этого выбираем участок теплообмена таким образом, чтобы на одной из его границ была известная температура, а на другой – искомая. Затем по основной формуле стационарной теплопроводности в стенке находим неизвестную температуру:

$$q = \frac{(T_{w1} - T_{1-2})}{R_{t1}} = \frac{(T_{1-2} - T_{w2})}{R_{t2}},$$

отсюда

$$T_{1-2} = T_{w1} - q \cdot R_{t1} \text{ или } T_{1-2} = T_{w2} + q \cdot R_{t2}.$$

Рассчитаем неизвестную температуру, выбрав первое из полученных расчетных выражений:

$$T_{1-2} = T_{w1} - q \cdot R_{t1} = 705 - 373,9 \cdot 1,515 = 138,6 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Задача № 2 (тема «Стационарная теплопроводность в цилиндрической стенке»)

Рассчитать тепловые потери с одного погонного метра двухслойной цилиндрической стенки с внутренним диаметром $d_1 = 150$ мм, толщиной и коэффициентом теплопроводности первого слоя соответственно $\delta_1 = 7,5$ мм и

$\lambda_1 = 50 \text{ Вт/(м·К)}$, толщиной и коэффициентом теплопроводности второго слоя соответственно $\delta_2 = 60 \text{ мм}$ и $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт/(м·К)}$. Температура на внутренней поверхности цилиндрической стенки $T_{w1} = 90 \text{ °С}$, а на наружной – $T_{w2} = -15 \text{ °С}$.

Дано:

$d_1 = 150 \text{ мм}$, $\delta_1 = 7,5 \text{ мм}$; $\delta_2 = 60 \text{ мм}$; $\lambda_1 = 50 \text{ Вт/(м·К)}$;
 $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт/(м·К)}$; $T_{w1} = 90 \text{ °С}$; $T_{w2} = -15 \text{ °С}$

Найти: q_ℓ ; T_{1-2}

Решение:

В координатах (T, r) изобразим цилиндрическую двухслойную стенку и температурное поле в процессе теплопроводности (рис. 4). Отметим на рисунке известные по условию задачи величины.

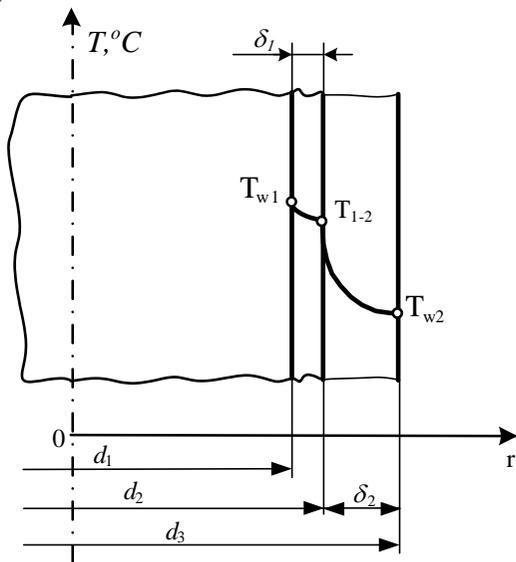


Рис. 4. Стационарное температурное поле в цилиндрической двухслойной стенке

Решение прямой задачи выполняем по алгоритму, изложенному в разделе 2.4.4 пособия [1] (стр. 65).

1. Рассчитываем линейные термические сопротивления теплопроводности всех слоев стенки, предварительно определив неизвестные диаметры d_2 и d_3 :

$$d_2 = d_1 + 2\delta_1 = 0,15 + 2 \cdot 0,0075 = 0,165 \text{ мм};$$

$$d_3 = d_2 + 2\delta_2 = 0,165 + 2 \cdot 0,06 = 0,285 \text{ мм}.$$

Линейное термическое сопротивление – первого слоя цилиндрической стенки:

$$R_{\ell 1} = \frac{1}{2\lambda_1} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \frac{1}{2 \cdot 50} \ln\left(\frac{0,165}{0,15}\right) = 0,0009531 \text{ (м·К)/Вт};$$

– второго слоя цилиндрической стенки:

$$R_{\ell 2} = \frac{1}{2\lambda_2} \ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right) = \frac{1}{2 \cdot 0,15} \ln\left(\frac{0,285}{0,165}\right) = 1,822 \text{ (м·К)/Вт}.$$

2. Находим линейную плотность теплового потока по двум заданным температурам и термическим сопротивлениям участков между этими температурами:

$$q_{\ell} = \frac{\pi(T_{w1} - T_{w2})}{R_{\ell 1} + R_{\ell 2}} = \frac{3,14 \cdot (90 - (-15))}{0,0009531 + 1,822} = 180,7 \text{ Вт/м}.$$

5.2. Пример решения задач по теме «Конвективный теплообмен» (задача № 3)

Рассчитать переданную теплоту за сутки от стенки трубы водонагревателя, если длина трубы $L = 2$ м, диаметр $d = 16$ мм. Расход воды $G = 715$ кг/ч, а ее средняя температура $T_f = 40$ °С. Температура стенки трубы водонагревателя $T_w = 100$ °С.

Дано:

$L = 2 \text{ м}$; $d = 16 \text{ мм}$; $G = 715 \text{ кг/ч}$; $T_f = 40 \text{ °C}$; $T_w = 100 \text{ °C}$;
 $\tau = 1 \text{ сутки}$; флюид (f) – вода

Найти: Q_τ

Решение:

Количество переданной теплоты за сутки рассчитаем как произведение теплового потока и времени процесса:

$$Q_\tau = Q \cdot \tau. \quad (68)$$

Тепловой поток найдем по закону теплоотдачи Ньютона:

$$Q = \alpha \cdot \Delta T \cdot F,$$

где $\Delta T = T_w - T_f = 100 - 40 = 60 \text{ °C}$ – разность температур между стенкой и флюидом; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ;

$$F = \pi dL = 3,14 \cdot 0,016 \cdot 2 = 0,1 \text{ м}^2. \quad (69)$$

Коэффициент теплоотдачи α рассчитаем по алгоритму, изложенному в разделе 4.4 пособия [1] (с. 168).

Расчет коэффициента теплоотдачи

1. Определяем вид конвективного теплообмена.

Поскольку движение теплоносителя с постоянным расходом G обеспечивает внешняя сила (побудитель движения – насос), конвекция в прямой гладкой трубе вынужденная.

Определив вид конвективного теплообмена, находим в справочной литературе критериальное уравнение, подходящее для рассматриваемого объекта. Например, из литературы [4] выбираем раздел «Теплоотдача при движении флюида в прямых гладких трубах» (п. 3.2.1. с. 94).

Ознакомившись с материалом раздела, определяем, что вид критериального уравнения для расчета безразмер-

ного коэффициента теплоотдачи (критерия Нуссельта – Nu) определяется режимом движения текучей среды.

2. Следуя комментариям к выбранному разделу, задаем определяющие параметры. Для вынужденной конвекции это:

– определяющая температура. Принимается равной средней температуре флюида $T_0 = T_f = 40$ °С (по указанной температуре в справочных материалах находим физические свойства текучей среды (воды));

– определяющий размер. При движении флюида в прямых гладких трубах принимается равным внутреннему диаметру канала $R_0 = d = 0,016$ м;

– определяющая скорость. Принимается равной средней скорости флюида в трубе. Рассчитываем w_0 , используя уравнение неразрывности:

$$w_0 = \frac{G}{\rho \cdot f},$$

где G – массовый расход воды, кг/с; ρ – плотность текучей среды, кг/м³, определяем по таблице физических свойств воды: $\rho(T_0) = 992,2$ кг/м³; f – площадь поперечного сечения трубы:

$$f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,016^2}{4} = 0,0002 \text{ м}^2.$$

Определяющая скорость:

$$w_0 = \frac{G}{\rho \cdot f} = \frac{715 / 3600}{992,2 \cdot 0,0002} = 1 \text{ м/с}.$$

3. Определяем режим движения текучей среды по значению критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_0 R_0}{\nu},$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$, определяем по таблице физических свойств воды: $\nu(T_0) = 0,659 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

$$\text{Re} = \frac{w_0 R_0}{\nu} = \frac{1 \cdot 0,016}{0,659 \cdot 10^{-6}} = 24279.$$

В соответствии с комментариями к выбранному разделу справочной литературы [4] при $\text{Re} \geq 10^4$ режим движения текучей среды турбулентный.

Замечание: при $\text{Re} \leq 2300$ – режим движения флюида ламинарный, а при $2300 < \text{Re} < 10^4$ – переходный от ламинарного к турбулентному.

При турбулентном режиме движения флюида критериальное уравнение имеет вид:

$$\overline{\text{Nu}} = 0,021 \cdot \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \varepsilon_t \overline{\varepsilon}_t, \quad (70)$$

где Pr – критерий Прандтля флюида. Находим в таблице свойств воды по определяющей температуре: $\text{Pr}(T_0) = 4,31$; ε_t – температурная поправка, учитывающая зависимость теплофизических свойств среды от температуры. Рассчитываем по формуле М.А. Михеева [1, 4]:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}, \quad (71)$$

где Pr_w – критерий Прандтля флюида при температуре стенки: $\text{Pr}(T_w) = 1,75$.

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25} = \left(\frac{4,31}{1,75} \right)^{0,25} = 1,253;$$

$\overline{\varepsilon}_t$ – поправка, учитывающая влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена. В соответствии с [1, 4]

$$- \text{при } L/d \geq 50 \quad \overline{\varepsilon}_\ell = 1, \quad (72)$$

$$- \text{при } L/d < 50 \quad \overline{\varepsilon}_\ell \approx 1 + \frac{2d}{L}. \quad (73)$$

В данном случае: $L/d = 2/0,016 = 125$, следовательно, $\overline{\varepsilon}_\ell = 1$.

4. Рассчитываем безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий Нуссельта по выбранному критериальному уравнению:

$$\begin{aligned} \overline{Nu} &= 0,021 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,43} \varepsilon_i \overline{\varepsilon}_\ell = \\ &= 0,021 \cdot (24279)^{0,8} \cdot (4,31)^{0,43} \cdot 1,253 \cdot 1 = 158,92. \end{aligned}$$

5. Рассчитываем коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_f}{R_0},$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К).
Находим в справочнике по определяющей температуре:
 $\lambda_f(T_0) = 63,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К).

Тогда

$$\alpha = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_f}{R_0} = \frac{158,92 \cdot 63,5 \cdot 10^{-2}}{0,016} = 6307,14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Рассчитываем тепловой поток, передаваемый стенкой трубы водонагревателя воде:

$$Q = \alpha \cdot \Delta T \cdot F = 6307,14 \cdot 60 \cdot 0,1 = 37842,8 \text{ Вт}.$$

Количество переданной теплоты за сутки (время – в секундах в системе СИ)

$$Q_{\tau} = Q \cdot \tau = 37842,84 \cdot 86400 = 3269621376 \text{ Дж} = \\ = 3,27 \text{ ГДж}.$$

5.3. Пример решения задач по теме «Конвективный теплообмен при фазовых превращениях» (задача № 4)

Теплоотдача при пленочной конденсации

На поверхности вертикальной трубы высотой $H = 2$ м происходит пленочная конденсация сухого насыщенного водяного пара. Давление пара $p_n = 1,013$ бар. Температура поверхности трубы $T_w = 95$ °С. Определить значение среднего по поверхности теплообмена коэффициента теплоотдачи. При расчете считать течение пленки конденсата ламинарным по всей высоте трубы.

Дано:

$H = 2$ м; $p_n = 1,013$ бар; $T_w = 95$ °С;

флюид (f) – водяной пар/вода

Найти: α

Решение:

Расчет среднего по поверхности теплообмена коэффициента конвективной теплоотдачи выполним по алгоритму, изложенному в разделе 5.1.3 пособия [1] (с. 215), учитывая особенности теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества.

1. Определяем вид конвективного теплообмена: конвективная теплоотдача при пленочной конденсации пара у поверхности вертикальной трубы.

Выбираем формулу для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи. Для расчета ламинарного режима течения пленки конденсата на вертикальной поверхности воспользуемся формулой Нуссельта:

$$\bar{\alpha} = 0,943 \cdot 4 \sqrt{\frac{g \cdot r \cdot \rho_{пл}^2 \cdot \lambda_{пл}^3}{\mu_{пл} \cdot (T_H - T_w) \cdot H}}$$

2. Определяющие параметры:

– определяющая температура – температура насыщения воды при заданном давлении. В соответствии с [4] $T_0 = T_H(p_H) = 100$ °С. Используем указанную температуру для определения физических свойств конденсата (воды);

– определяющий размер. При конденсации на вертикальной поверхности – высота: $R_0 = H = 2$ м.

В справочных материалах [4] находим удельную теплоту парообразования и теплофизические свойства воды при температуре T_0 :

$$r(T_0) = 2256,8 \text{ кДж/кг}; \rho_{пл}(T_0) = 958,4 \text{ кг/м}^3;$$

$$\lambda_{пл}(T_0) = 68,3 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \mu_{пл}(T_0) = 282,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

3. Рассчитываем средний по поверхности теплообмена коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= 0,943 \cdot 4 \sqrt{\frac{g r \rho_{пл}^2 \lambda_{пл}^3}{\mu_{пл} (T_H - T_w) H}} = \\ &= 0,943 \cdot 4 \sqrt{\frac{9,81 \cdot 2256,8 \cdot 10^3 \cdot 958,4^2 \cdot (68,3 \cdot 10^{-2})^3}{282,5 \cdot 10^{-6} (100 - 95) \cdot 2}} = \\ &= 6525,84 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

Теплоотдача при кипении жидкостей

Определить коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной поверхности трубки испарителя к кипящей воде и температуру поверхности, если тепловая нагрузка $q = 200$ кВт/м². Режим кипения пузырьковый при давлении $p_H = 0,2$ МПа.

Дано:

$q = 200 \text{ кВт/м}^2$; $p_n = 0,2 \text{ МПа}$; флюид (f) – вода/водяной пар

Найти: α ; T_w

Решение:

Расчет среднего по поверхности теплообмена коэффициента конвективной теплоотдачи выполним по алгоритму, изложенному в разделе 5.2.5 пособия [1] (с. 236), учитывая особенности теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества.

1. Определяем вид конвективного теплообмена: конвективная теплоотдача при пузырьковом режиме кипения воды в большом объеме при граничных условиях II рода.

Выбираем формулу для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи. При постоянной тепловой нагрузке поверхности теплообмена:

$$\bar{\alpha} = 3q^{0,7} p_n^{0,15},$$

где p_n – давление насыщения кипящей воды, бар.

2. Определяющие параметры:

– определяющая температура – температура насыщения воды при заданном давлении. В соответствии с [4] $T_0 = T_n(p_n) = 120,23 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Рассчитываем коэффициент конвективной теплоотдачи при пузырьковом кипении воды:

$$\begin{aligned}\bar{\alpha} &= 3q^{0,7} p_n^{0,15} = 3 \cdot (200 \cdot 10^3)^{0,7} \cdot 2^{0,15} = \\ &= 17100,03 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 17,1 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).\end{aligned}$$

Неизвестную температуру поверхности теплообмена найдем, воспользовавшись законом теплоотдачи Ньютона:

$$q = \bar{\alpha}(T_w - T_n).$$

Тогда температура поверхности:

$$T_w = T_H + \frac{q}{\alpha} = 120,23 + \frac{200 \cdot 10^3}{17100,03} = 131,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5.4. Пример решения задач по теме «Теплообмен излучением» (задача № 5)

Стальная труба диаметром $d = 100$ мм находится в кирпичном канале размером $a \times b = 0,3 \times 0,3$ м (рис. 6). Температура поверхности трубы $T_1 = 150$ °С, степень черноты наружной поверхности трубы $\varepsilon_1 = 0,7$. Температура внутренней поверхности кирпичной стенки $T_2 = 37$ °С, степень черноты стенки $\varepsilon_2 = 0,8$. Определить потерю теплоты излучением с одного погонного метра трубы.

Дано:

$d = 100$ мм; $a \times b = 0,3 \times 0,3$ м; $T_1 = 150$ °С; $T_2 = 37$ °С;
 $\varepsilon_1 = 0,7$; $\varepsilon_2 = 0,8$

Найти: $q_{\ell, w}$

Решение:

Рассчитаем линейную плотность результирующего теплового потока по формуле:

$$\begin{aligned} q_{\ell, w} &= \frac{Q_{w,2}}{\ell} = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} \pi d \ell}{\ell} = \\ &= \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} \pi d. \end{aligned}$$

Приведенную степень черноты системы рассчитаем по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{21}}.$$

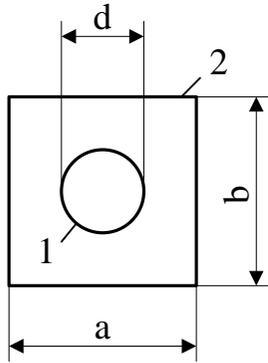


Рис. 6. Принципиальное изображение стальной трубы в кирпичном канале

Необходимые для расчета угловые коэффициенты излучения определим, используя свойства угловых коэффициентов:

а) свойство замкнутости:

$$\varphi_{11} + \varphi_{12} = 1 \text{ и } \varphi_{21} + \varphi_{22} = 1;$$

б) свойство взаимности:

$$\varphi_{12}F_1 = \varphi_{21}F_2;$$

в) свойство невогнутости: для стальной трубы как невогнутого (выпуклого) тела:

$$\varphi_{11} = 0.$$

Используя свойства замкнутости и невогнутости, получаем $\varphi_{12} = 1$.

Из свойства взаимности:

$$\varphi_{21} = \varphi_{12} \frac{F_1}{F_2} = \frac{F_1}{F_2},$$

где F_1 и F_2 – площади излучающих поверхностей соответственно первого и второго тела:

$$F_1 = \pi d \ell;$$

$$F_2 = 2(a + b) \ell;$$

$$\Phi_{21} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\pi d \ell}{2(a + b) \ell} = \frac{\pi d}{2(a + b)} = \frac{3,14 \cdot 0,1}{2(0,3 + 0,3)} = 0,262.$$

Рассчитаем приведенную степень черноты:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{пр}} &= \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) \Phi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \Phi_{21}} = \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,7} - 1\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{0,8} - 1\right) \cdot 0,262} = 0,669. \end{aligned}$$

Рассчитаем линейную плотность результирующего теплового потока излучением в системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой:

$$\begin{aligned} q_{\ell, w} &= \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \Phi_{12} \pi d = 0,669 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \times \\ &\times \left((150 + 273)^4 - (37 + 273)^4 \right) \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,1 = 273,3 \text{ Вт/м}. \end{aligned}$$

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2

В контрольную работу №2 включены вопросы и задачи, рассматривающие перенос теплоты в процессе стационарной теплопередачи через плоскую (задача № 1) и ци-

линдрическую стенку (задача № 2), а также в рекуперативном теплообменном аппарате (задача № 3).

Ниже приведены примеры решения типовых задач по изучаемым темам.

6.1. Примеры решения задач по темам «Стационарная теплопередача через плоскую стенку» и «Стационарная теплопередача через цилиндрическую стенку» (задачи № 1 и № 2)

Задача № 1 (тема «Стационарная теплопередача через плоскую стенку»)

Определить тепловой поток через 1 м^2 кирпичной стены помещения толщиной в два кирпича ($\delta = 510 \text{ мм}$) с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Температура воздуха внутри помещения $T_{f1} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$; коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки $\alpha_1 = 7,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; температура наружного воздуха $T_{f2} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены $\alpha_2 = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Вычислить также температуру внутренней и внешней поверхности стены.

Дано:

$T_{f1} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{f2} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$; $\alpha_1 = 7,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$;
 $\alpha_2 = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; $\lambda = 0,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\delta = 510 \text{ мм}$

Найти: q , T_{w1} , T_{w2}

Решение:

Изобразим принципиальную схему процесса теплопередачи через плоскую однослойную стенку (рис. 7).

Решим задачу по алгоритму для прямой задачи, изложенному в разделе 2.4.4 учебного пособия [1] (стр. 65).

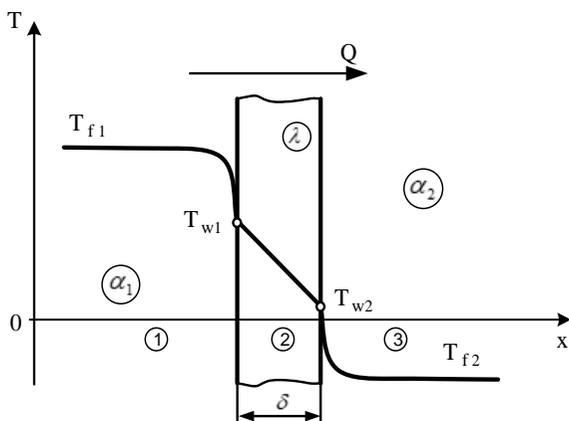


Рис. 7. Теплопередача через плоскую однослойную стенку

1. Рассчитываем термические сопротивления всех участков теплопередачи:

а) теплоотдачи от горячего флюида к плоской стенке:

$$R_{t1} = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{7,5} = 0,1333 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт};$$

б) теплопроводности плоской стенки:

$$R_{t2} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,51}{0,8} = 0,6375 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт};$$

в) теплоотдачи от плоской стенки к холодному флюиду:

$$R_{t3} = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}.$$

2. По двум известным температурам и термическому сопротивлению участков между этими температурами находим поверхностную плотность теплового потока

(тепловой поток, проходящий через 1 м² поверхности теплообмена):

$$q = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R_{t1} + R_{t2} + R_{t3}} = \frac{18 - (-30)}{0,1333 + 0,6375 + 0,05} = 58,5 \text{ Вт/м}^2.$$

3. Рассчитываем неизвестные температуры T_{w1} и T_{w2} .

Записываем основную формулу теплопередачи для участка теплопередачи, на котором одна температура известна, а другая – искомая.

Рассчитаем температуру T_{w1} . Поскольку известны две температуры (T_{f1} и T_{f2}), то вариантов расчёта также два:

$$q = \frac{T_{f1} - T_{w1}}{R_{t1}} = \frac{T_{w1} - T_{f2}}{R_{t2} + R_{t3}} \Rightarrow$$

а) $T_{w1} = T_{f1} - q \cdot R_{t1} = 18 - 58,48 \cdot 0,1333 = 10,21 \text{ }^\circ\text{C};$

б) $T_{w1} = T_{f2} + q \cdot (R_{t2} + R_{t3}) = -30 + 58,48 \cdot (0,6375 + 0,05) = 10,2 \text{ }^\circ\text{C}.$

Аналогично определим температуру T_{w2} .

$$q = \frac{T_{f1} - T_{w2}}{R_{t1} + R_{t2}} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{R_{t2}} = \frac{T_{w2} - T_{f2}}{R_{t3}}.$$

Один из трех вариантов расчетных выражений:

$$T_{w2} = T_{f2} + q \cdot R_{t3} = -30 + 58,48 \cdot 0,05 = -27,1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задача № 2 (тема «Стационарная теплопередача через цилиндрическую стенку»)

По трубопроводу диаметром $d_1/d_2 = 25/29$ мм ($\lambda_1 = 50$ Вт/(м·К), покрытому слоем тепловой изоляции толщиной $\delta_2 = 25$ мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda_2 = 0,06$ Вт/(м·К), проходит насыщенный водяной пар с температу-

рой $T_{f1} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить суточную потерю теплоты участка трубопровода длиной 30 м и температуру наружной поверхности изоляции, если коэффициент теплоотдачи от пара к стенке $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от внешней поверхности изоляции к окружающему воздуху $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура воздуха $T_{f2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Дано:

$d_1/d_2 = 25/29 \text{ мм}$; $\delta_2 = 25 \text{ мм}$; $T_{f1} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{f2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\lambda_1 = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
 $\lambda_2 = 0,06 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\ell = 30 \text{ м}$; $\tau = 1 \text{ сутки}$

Найти: Q_τ , T_{w2}

Решение:

Изобразим принципиальную схему процесса теплопередачи через двухслойную цилиндрическую стенку (рис. 8).

Решим задачу по алгоритму для прямой задачи, изложенному в разделе 2.4.4 учебного пособия [1] (стр. 65), предварительно рассчитав внешний диаметр изоляции по формуле:

$$d_3 = d_2 + 2\delta_2 = 29 + 2 \cdot 25 = 79 \text{ мм.} \quad (31)$$

1. Рассчитываем термические сопротивления всех участков теплопередачи:

а) теплоотдачи от горячего флюида к стенке:

$$R_{\tau 1} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} = \frac{1}{2000 \cdot 25 \cdot 10^{-3}} = 0,02 \text{ м} \cdot \text{К}/\text{Вт};$$

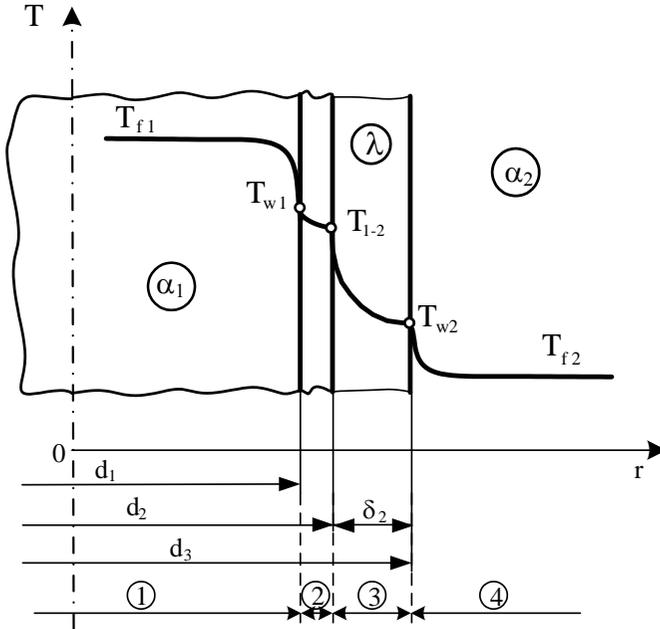


Рис. 8. Теплопередача через двухслойную цилиндрическую стенку

б) теплопроводности первого слоя цилиндрической стенки (трубы):

$$R_{\ell 2} = \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2 \cdot 50} \ln \frac{29 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} = 0,001484 \text{ м·К /Вт};$$

в) теплопроводности второго слоя цилиндрической стенки (тепловой изоляции):

$$R_{\ell 3} = \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} = \frac{1}{2 \cdot 0,06} \ln \frac{79 \cdot 10^{-3}}{29 \cdot 10^{-3}} = 8,351 \text{ м·К /Вт};$$

г) теплоотдачи от цилиндрической стенки к холодному флюиду:

$$R_{\ell 4} = \frac{1}{\alpha_2 d_3} = \frac{1}{10 \cdot 79 \cdot 10^{-3}} = 1,266 \text{ м}\cdot\text{К}/\text{Вт}.$$

2. По двум известным температурам и термическому сопротивлению участков между этими температурами находим линейную плотность теплового потока (тепловой поток, уходящий с одного погонного метра цилиндрической стенки):

$$q_{\ell} = \frac{\pi(T_{f1} - T_{f2})}{R_{\ell 1} + R_{\ell 2} + R_{\ell 3} + R_{\ell 4}} =$$

$$= \frac{\pi \cdot (100 - 10)}{0,02 + 0,001484 + 8,351 + 1,266} = 29,3 \text{ Вт/м}.$$

Определим тепловой поток, уходящий с поверхности трубопровода заданной длины:

$$Q = q_{\ell} \cdot \ell = 29,33 \cdot 30 = 879,9 \text{ Вт}.$$

Суточная потеря теплоты:

$$Q_{\tau} = Q \cdot \tau = 879,90 \cdot 24 \cdot 3600 = 76023360 \text{ Дж} =$$

$$= 76,02 \text{ МДж}.$$

3. Рассчитываем неизвестную температуру T_{w2} .

Записываем основную формулу теплопередачи для участка теплопередачи, на котором одна температура известна, а другая – искомая T_{w2} .

Поскольку известны две температуры (T_{f1} и T_{f2}), то вариантов расчёта также два:

$$q_{\ell} = \frac{\pi(T_{f1} - T_{w2})}{R_{\ell 1} + R_{\ell 2} + R_{\ell 3}} = \frac{\pi(T_{w2} - T_{f2})}{R_{\ell 3}} \Rightarrow$$

$$\text{а) } T_{w2} = T_{f1} - \frac{q_{\ell}}{\pi} \cdot (R_{\ell 1} + R_{\ell 2} + R_{\ell 3}) =$$

$$= 100 - \frac{29,33}{\pi} \cdot (0,02 + 0,001484 + 8,351) = 21,8 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\text{б) } T_{w2} = T_{f2} + \frac{q_{\ell}}{\pi} R_{\ell 2} = 10 + \frac{29,33}{\pi} 1,266 = 21,8 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

6.2. Примеры решения задач по теме «Теплообменные аппараты» (задача № 3)

Изменение агрегатного состояния теплоносителя

Определить расход пара на обогрев воды в пароводяном теплообменном аппарате при условии, что весь пар превращается в конденсат, выходящий из теплообменника в состоянии насыщения при давлении греющего пара $p_{н1} = 0,12 \text{ МПа}$. Найти площадь поверхности теплообмена при условии, что коэффициент теплопередачи равен $k = 2700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, расход воды составляет $V_2 = 2 \text{ м}^3/\text{мин}$, температура воды на входе и на выходе из теплообменного аппарата соответственно $T_2' = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_2'' = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Степень сухости пара – $x_1 = 0,98$. Построить схематично графики изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена.

Дано:

$p_{н1} = 0,12 \text{ МПа}$; $x_1 = 0,98$; $T_2' = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_2'' = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $V_2 = 2 \text{ м}^3/\text{мин}$; $k = 2700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Найти: G_1, F

Решение:

Горячим (греющим) теплоносителем является влажный насыщенный водяной пар, переходящий в конденсат, а холодным (нагреваемым) – вода.

Запишем уравнение теплового баланса рекуперативного теплообменного аппарата. В случае, если горячий теплоноситель изменяет свое агрегатное состояние (пар, отдавая тепловую энергию, конденсируется), а холодный

теплоноситель – нет, уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$Q = G_1 r_1 x_1 = G_2 c_{p2} (T_2'' - T_2'),$$

где G_1 и G_2 – массовые расходы соответственного горячего и холодного теплоносителей, кг/с; r_1 – удельная теплота парообразования горячего теплоносителя (конденсирующегося пара), Дж/кг; x_1 – степень сухости пара; c_{p2} – удельная массовая изобарная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); T_2' и T_2'' – температуры холодного теплоносителя на входе и выходе из теплообменного аппарата, °С.

Определим тепловую мощность теплообменного аппарата, используя правую часть уравнения теплового баланса.

Массовый расход воды определим по формуле:

$$G_2 = V_2 \rho_2, \quad (32)$$

где V_2 – объемный расход холодного теплоносителя, м³/с; ρ_2 – плотность холодного теплоносителя, кг/м³.

Плотность воды, как и ее теплоемкость, находим в справочнике [4] по средней температуре теплоносителя:

$$T_2 = \frac{T_2' + T_2''}{2} = \frac{25 + 75}{2} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\begin{aligned} \text{Находим: } \rho_2(T_2) &= 988,1 \text{ кг/м}^3; \\ c_{p2}(T_2) &= 4,174 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}. \end{aligned}$$

Определяем массовый расход холодного теплоносителя и Q :

$$G_2 = V_2 \rho_2 = \frac{2}{60} \cdot 988,1 = 32,94 \text{ кг/с}.$$

$$\begin{aligned} Q &= G_2 c_{p2} (T_2'' - T_2') = 32,94 \cdot 4,174 \cdot 10^3 (75 - 25) = \\ &= 6874578 \text{ Вт} = 6,87 \text{ МВт}. \end{aligned}$$

Выразим из левой части уравнения теплового баланса расход греющего теплоносителя G_1 :

$$G_1 = \frac{Q}{r_1 x_1}.$$

Удельную теплоту парообразования r_1 найдем в справочнике [4] по давлению насыщения горячего теплоносителя: $r_1(p_{н1}) = 2247$ кДж / кг.

Рассчитаем расход греющего пара:

$$G_1 = \frac{Q}{r_1 x_1} = \frac{6874578}{2247 \cdot 10^3 \cdot 0,98} = 3,12 \text{ кг / с.}$$

Запишем уравнение теплопередачи для рекуперативного теплообменного аппарата:

$$Q = k \overline{\Delta T} F,$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $\overline{\Delta T}$ – средняя разность температур (средний температурный напор), °С; F – площадь поверхности теплообмена, м².

Выразим из уравнения искомую площадь поверхности теплообмена:

$$F = \frac{Q}{k \overline{\Delta T}}.$$

Среднюю разность температур в аппарате определим, построив график изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена (рис. 9). Предварительно определим в справочнике температуру горячего теплоносителя по известному давлению: $T_1(p_{н1}) = 103,75$ °С.

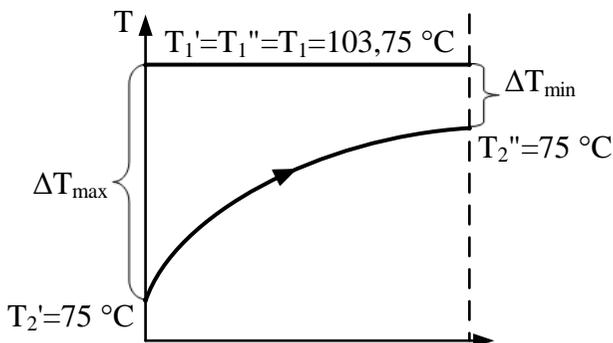


Рис. 9. График изменения температур теплоносителей в теплообменном аппарате

Определим разность температур на левой и правой границе теплообменного аппарата, выбрав затем большую и меньшую из них:

$$T_1 - T_2' = 103,75 - 25 = 78,75 \text{ } ^\circ\text{C} = \Delta T_{\max};$$

$$T_1 - T_2'' = 103,75 - 75 = 28,75 \text{ } ^\circ\text{C} = \Delta T_{\min}.$$

Рассчитаем среднюю разность температур по формуле (30):

$$\begin{aligned} \text{при } \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} &= \frac{78,75}{28,75} = 2,74 > 2 \Rightarrow \overline{\Delta T_{\text{л}}} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} = \\ &= \frac{78,75 - 28,75}{\ln\left(\frac{78,75}{28,75}\right)} = 49,62 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Площадь поверхности теплообмена:

$$F = \frac{Q}{k\Delta T} = \frac{6874578}{2700 \cdot 49,62} = 51,31 \text{ м}^2.$$

Однофазные теплоносители

Определить площадь поверхности нагрева рекуперативного теплообменного аппарата при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей, если газом с начальной температурой $T_1' = 600\text{ }^\circ\text{C}$ и конечной температурой $T_1'' = 300\text{ }^\circ\text{C}$ необходимо нагреть $G_2 = 10\text{ кг/с}$ воздуха от $T_2' = 30\text{ }^\circ\text{C}$ до $T_2'' = 250\text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопередачи равен $k = 20\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Дано:

$T_1' = 600\text{ }^\circ\text{C}$; $T_1'' = 300\text{ }^\circ\text{C}$; $T_2' = 30\text{ }^\circ\text{C}$; $T_2'' = 250\text{ }^\circ\text{C}$;
 $G_2 = 10\text{ кг/с}$; $k = 20\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$

Найти: F_{\gg} , F_{\langle}

Решение:

Горячим (греющим) теплоносителем является газ, а холодным (нагреваемым) – воздух.

Запишем уравнение теплового баланса рекуперативного теплообменного аппарата. В случае однофазных теплоносителей уравнение будет иметь вид:

$$Q = G_1 c_{p1} (T_1' - T_1'') = G_2 c_{p2} (T_2'' - T_2'),$$

где G_1 и G_2 – массовые расходы соответственного горячего и холодного теплоносителей, кг/с; c_{p1} и c_{p2} – удельные массовые изобарные теплоемкости соответственно горячего и холодного теплоносителя, Дж/(кг·К); T_1' и T_1'' – температуры горячего теплоносителя на входе и выходе из теплообменного аппарата, $^\circ\text{C}$; T_2' и T_2'' – температуры холодного теплоносителя на входе и выходе из теплообменного аппарата, $^\circ\text{C}$.

Определим тепловую мощность теплообменника, используя правую часть уравнения теплового баланса.

Теплоемкость воздуха находим в справочнике [4] из основного списка литературы по средней температуре теплоносителя:

$$T_2 = \frac{T_2' + T_2''}{2} = \frac{30 + 250}{2} = 140 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Находим: $c_{p2}(T_2) = 1,013 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Определяем тепловой поток:

$$\begin{aligned} Q &= G_2 c_{p2} (T_2'' - T_2') = 10 \cdot 1,013 \cdot 10^3 (250 - 30) = \\ &= 2228600 \text{ Вт} = 2,23 \text{ МВт}. \end{aligned}$$

Запишем уравнение теплопередачи для рекуперативного теплообменного аппарата:

$$Q = k \overline{\Delta T} F,$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $\overline{\Delta T}$ – средняя разность температур в теплообменном аппарате, $^\circ\text{C}$; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 .

Выразим из уравнения искомую площадь поверхности теплообмена:

$$F = \frac{Q}{k \overline{\Delta T}}.$$

Среднюю разность температур определим, построив график изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена. Поскольку графики будут иметь разный вид в зависимости от схемы движения теплоносителей, рассмотрим два случая по отдельности.

Прямоток (направления движения теплоносителей в теплообменном аппарате совпадают).

Графики изменения температур для холодного и горячего теплоносителей – логарифмические кривые, выпуклость которых в случае прямотока направлена встречно (к центру) (рис. 11).

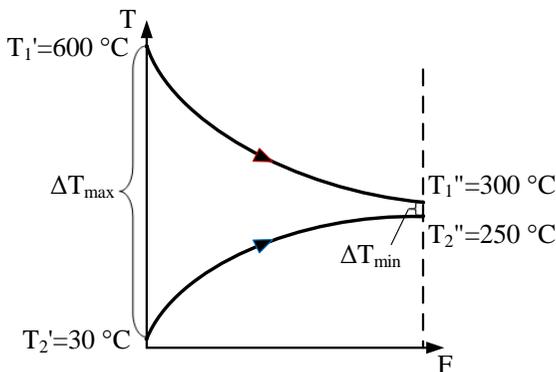


Рис. 11. График изменения температуры теплоносителей в теплообменном аппарате при проточке

Найдем разность температур на левой и правой границе теплообменного аппарата, выбрав затем большую и меньшую из них:

$$T_1' - T_2' = 600 - 30 = 570 \text{ } ^\circ\text{C} = \Delta T_{\max};$$

$$T_1'' - T_2'' = 300 - 250 = 50 \text{ } ^\circ\text{C} = \Delta T_{\min}.$$

Рассчитаем среднюю разность температур в теплообменнике при проточной схеме движения теплоносителей по формуле (30):

$$\text{при } \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} = \frac{570}{50} = 11,4 > 2 \Rightarrow$$

$$\overline{\Delta T}_{\gg} = \overline{\Delta T}_{\text{л}} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} = \frac{570 - 50}{\ln\left(\frac{570}{50}\right)} = 213,67 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Площадь поверхности теплообмена:

$$F_{\gg} = \frac{Q}{k \Delta T_{\gg}} = \frac{2228600}{20 \cdot 213,67} = 521,51 \text{ м}^2.$$

Противоток (направления движения теплоносителей в теплообменном аппарате встречное).

Графики изменения температур для холодного и горячего теплоносителей – логарифмические кривые, выпуклость которых в случае противотока направлена в сторону теплоносителя с меньшим изменением температуры (с большей расходной теплоемкостью) (рис. 12).

Изменение температуры горячего газа:

$$\delta T_1 = T_1' - T_1'' = 600 - 300 = 300 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Изменение температуры холодного воздуха:

$$\delta T_2 = T_2'' - T_2' = 250 - 30 = 220 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таким образом, выпуклость температурных графиков направлена в сторону холодного теплоносителя.

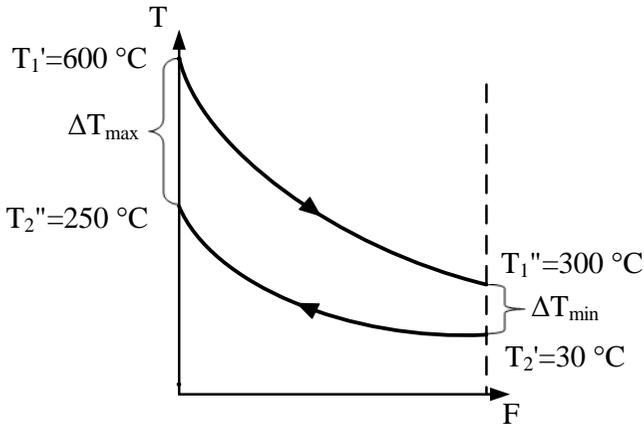


Рис. 12. График изменения температур теплоносителей в теплообменном аппарате при противотоке

Найдем разность температур на левой и правой границе теплообменного аппарата, выбрав затем большую и меньшую из них:

$$T_1' - T_2'' = 600 - 250 = 350 \text{ }^{\circ}\text{C} = \Delta T_{\max};$$

$$T_1'' - T_2' = 300 - 30 = 270 \text{ }^{\circ}\text{C} = \Delta T_{\min}.$$

Рассчитаем среднюю разность температур в теплообменнике при противоточной схеме движения теплоносителей по формуле (29):

$$\text{при } \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} = \frac{350}{270} = 1,3 < 2 \Rightarrow$$

$$\overline{\Delta T}_{\langle \rangle} = \overline{\Delta T}_a = \frac{\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}}{2} = \frac{350 + 270}{2} = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Площадь поверхности теплообмена:

$$F_{\langle \rangle} = \frac{Q}{k \Delta T_{\langle \rangle}} = \frac{2228600}{20 \cdot 310} = 359,45 \text{ м}^2.$$

7. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Первая контрольная работа состоит из пяти вопросов и пяти типовых задач и охватывает «введение» и первые четыре темы рабочей программы. Вторая контрольная работа содержит три вопроса и две задачи по пятой и шестой темам рабочей программы соответственно.

Контрольные работы выполняются в тетради или на листах формата А4. Для заметок рецензента оставляют поля и в конце работы одну чистую страницу. Формулировки контрольных вопросов и условия задач нужно переписывать полностью.

Решения задач необходимо сопровождать краткими пояснениями и подробными вычислениями. При определении какой-либо величины нужно словами указать, какая величина определяется. В процессе решения задач необходимо сначала привести формулы, лежащие в основе вычислений, выполнить их преобразования и лишь затем подставить соответствующие числовые значения и произвести вычисления. Обязательно следует указать единицы измерения величин, как заданных в условии задач, так и найденных в результате решения задач. Следует придерживаться принятой в учебнике системы обозначений, терминов и Международной системы единиц СИ.

Ответы на контрольные вопросы должны быть исчерпывающими, но не избыточными.

При выполнении расчетов не следует стремиться к точности выше, чем 0,5 %.

В конце контрольной работы должна стоять подпись студента.

8. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бухмиров, В.В.** Тепломассообмен: учеб. пособие для бакалавров / В.В. Бухмиров; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.

2. **Бухмиров, В.В.** Тепломассообмен: учебник / В.В. Бухмиров; ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2023. – 360 с.

3. **Тепловой и гидравлический расчет** рекуперативного теплообменного аппарата: учеб. пособие / В.В. Бухмиров и др.; Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2021. – 164 с.

4. **Бухмиров, В.В.** Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен»: учеб. пособие / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина; ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина», – Иваново, 2017. – 120 с.

5. **Бухмиров, В.В.** Пакет задач по разделу «Стационарная теплопроводность и теплопередача» курса ТМО: учебно-метод. пособие / В.В. Бухмиров, Т.Е. Созинова; ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2018. – 88 с.

6. **Бухмиров, В.В.** Пакет задач по разделу «Радиационный теплообмен» курса ТМО: метод. указания / В.В. Бухмиров, Т.Е. Созинова; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – 2013. – 68 с.

7. **Бухмиров, В.В.** Теоретические основы теплотехники в примерах и задачах: учеб. пособие / В.В. Бухмиров, Г.Н. Щербакова, А.В. Пекунова; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – 2013. – 128 с.

БУХМИРОВ Вячеслав Викторович,
БУШУЕВ Евгений Николаевич,
РОДИОНОВА Мария Владимировна,
ГУСЕНКОВА Наталья Павловна

ТЕПЛОМАССОБМЕН

Учебно-методическое пособие
для выполнения контрольных работ
студентами факультета заочного и вечернего обучения
теплотехнических специальностей

Редактор Т.В. Соловьева

Подписано в печать Формат 60x84¹/₁₆.
Печать плоская. Усл.печ.л. 4,88. Уч.-изд. л. 4,1.
Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.