

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 25.09.2022 16:39:31

Уникальный программный ключ:

9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра теплогазоводоснабжения



ТЕПЛОМАССОБМЕН

Методические указания и задания к практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов очной и заочной формы обучения направлений подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.04.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Курск 2017 г.

УДК 536.2

Составители: В.А. Жмакин, Н.С. Кобелев, Е.М. Кувардина

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры
теплогазоводоснабжения В.С. Ежов

Тепломассообмен: методические указания и задания к практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов очной и заочной формы обучения направлений подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.04.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.А. Жмакин, Н.С. Кобелев, Е.М. Кувардина. – Курск, 2017. – 32 с.: ил. 9, табл. 8, прилож. 4. – Библиогр.: с. 28.

Приводятся задания к практическим занятиям и самостоятельной работе по теплообмену и примеры решения задач, а также необходимый справочный материал в виде таблиц.

Методические указания предназначены для студентов направлений подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.04.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» очной и заочной формы обучения и могут быть использованы студентами как для аудиторных практических занятий, так и для самостоятельной работы.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Усл. печ.л. Уч. изд.л. Тираж 100 экз. Заказ . Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

| | |
|---|----|
| Методические указания к заданиям и самостоятельной работе | 4 |
| Задача №1. Теплообмен теплопроводностью | 4 |
| Задача №2. Лучистый теплообмен. Экранирование | 7 |
| Задача №3. Сложный теплообмен | 10 |
| Задача №4. Теплопередача | 13 |
| Задача №5. Расчет теплообменного аппарата | 17 |
| Задача №6. Процессы массообмена | 22 |
| Контрольные вопросы | 24 |
| Библиографический список | 28 |
| Приложения | 29 |

Методические указания к заданиям и самостоятельной работе

1. Перед решением задач необходимо разобрать условие задачи и по последней (II) и предпоследней цифрам (III) учебного шифра выбрать в таблицах свои исходные данные.

2. При выполнении расчетной работы расчеты необходимо оформить в следующем виде: расчетная формула – формула с числовыми значениями всех входящих величин – результат вычисления – единицы измерения рассчитываемой величины.

Задача №1. Теплообмен теплопроводностью

Обмуровка печи состоит из слоев шамотного, δ_1 , [$\lambda=1,14$ Вт/(м·К)] и красного, δ_3 , [$\lambda=0,76$ Вт/(м·К)] кирпича, между которыми расположена засыпка из изоляционного материала, $\delta_2=250$ мм.

Определить тепловые потери через 1 м^2 поверхности стенки, если на внутренней стороне шамотного кирпича температура равна t_{w1} , а на наружной стороне красного кирпича t_{w2} . Какой толщины потребуется слой из красного кирпича, если отказаться от применения засыпки из изоляционного материала при тех же температурных условиях и неизменном тепловом потоке?

Данные, необходимые для решения задачи выбрать из табл. 1

Таблица 1 – Исходные данные к расчету

| Вариант II | δ_1 , мм | t_{w1} °C | Вариант III | δ_3 , мм | t_{w2} , °C | Изоляционный материал | |
|---------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|
| | | | | | | Название | $\lambda_2=...$, Вт/(м·К) |
| 0 | 80 | 1050 | 0 | 60 | 90 | Совелит | $0,0901+0,000087 \times t$ |
| 1 | 90 | 980 | 1 | 60 | 85 | Новоасбозурит | $0,144+0,00014 \times t$ |
| 2 | 80 | 1070 | 2 | 120 | 93 | Диатомит молот. | $0,091+0,00028 \times t$ |
| 3 | 100 | 950 | 3 | 60 | 97 | Вермикулит | $0,072+0,000362 \times t$ |
| 4 | 120 | 1030 | 4 | 125 | 86 | Асбослюда | $0,120+0,000148 \times t$ |
| 5 | 120 | 945 | 5 | 125 | 82 | Асботермит | $0,109+0,000145 \times t$ |
| 6 | 80 | 1020 | 6 | 125 | 94 | Асбозонолит | $0,143+0,00019 \times t$ |
| 7 | 90 | 990 | 7 | 60 | 78 | Асбозурит | $0,1622+0,000169 \times t$ |
| 8 | 80 | 1140 | 8 | 120 | 89 | Диатомит молот | $0,091+0,00028 \times t$ |
| 9 | 120 | 1135 | 9 | 60 | 91 | Шлаковая вата | $0,05+0,000145 \times t$ |

Примечания:

- 1) $t = (t_{w1} + t_{w2})/2$;
- 2) Расчетное значение толщины красного кирпича округлить (в сторону увеличения) до величины, кратной 60 мм.

Пример решения задачи 1.

Вычислить плотность теплового потока q , проходящего через 3-х слойную плоскую стенку (рис.1).

Первый слой выполнен из шамотного кирпича толщиной 400 мм; второй слой - диатомитовая засыпка толщиной 125 мм; третий слой - красный кирпич толщиной 120 мм.

Коэффициенты теплопроводности, соответственно: $\lambda_1 = 1,14$ Вт/(мК); $\lambda_2 = 0,091 + 0,0003 t$ Вт/(мК); $\lambda_3 = 0,76$ Вт/(мК).

Температура на внутренней стороне шамотного кирпича составляет $t_{w1} = 980$ °С, а на наружной стороне красного кирпича - $t_{w2} = 78$ °С.

Как изменится толщина красного кирпича, если отказаться от засыпки из диатомита, при тех же тепловом потоке и температурных условиях?

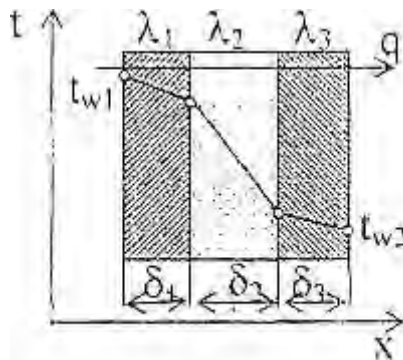


Рис.1. Расчетная схема 3-х слойной плоской стенки

Решение:

1) Находим тепловой поток q , Вт/м², через 3-х слойную плоскую стенку (рис.1) по формуле:

$$q = (t_{w1} - t_{w2}) / (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3) \quad (1)$$

где t_{w1} , t_{w2} - температуры поверхностей стенки, °С;

δ_1 , δ_2 , δ_3 - толщины слоев, м;

$(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3)$ - сумма термических сопротивлений слоев стенки, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Предварительно определяем коэффициент теплопроводности λ_2 , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, диатомитовой засыпки по формуле согласно табл.1:

$$\lambda_2 = 0,091 + 0,0003 \cdot t \quad (2)$$

где $t = 0,5(t_{w1} + t_{w2}) = 0,5(980 + 78) = 529 \text{ }^\circ\text{C}$ - средняя температура слоя засыпки (приблизительно).

$$\lambda_2 = 0,091 + 0,0003 \cdot 529 = 0,25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

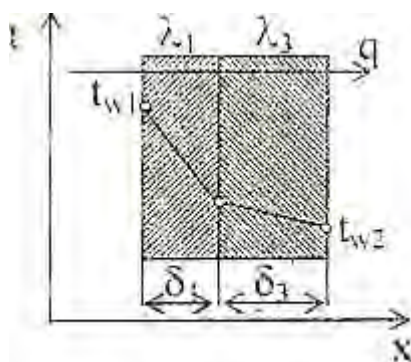


Рис. 2. Расчетная схема 2-х слойной плоской стенки

Подставляем полученное значение λ_2 в формулу (1) теплового потока и получаем:

$$q = (980 - 78) / (0,4/1,14 + 0,125/0,25 + 0,12/0,76) = 911 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

2) Если отказаться от слоя засыпки, то стенка станет 2-х слойной (см. рис.2). Обозначения на рисунке оставляем теми же, кроме новой толщины слоя красного кирпича δ_3 .

Тепловой поток через 2-х слойную стенку:

$$q = (t_{w1} - t_{w2}) / (\delta_1/\lambda_1 + \delta_3/\lambda_3), \text{ Вт}/\text{м}^2. \quad (3)$$

Т.к. q и $(t_{w1} - t_{w2})$ по условию задачи остались такими же, то термические сопротивления 3-х слойной и 2-х слойной стенок должны быть одинаковые, т.е.

$$(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3) = (\delta_1/\lambda_1 + \delta_3/\lambda_3),$$

Отсюда

$$\delta_3 = \lambda_3 (\delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3) \quad (4)$$

$$\delta_3 = 0,76(0,125/0,25 + 0,12/0,76) = 0,502 \text{ м} = 502 \text{ мм.}$$

Округляем эту величину до значения кратного 60 и получаем $\delta_3 = 540 \text{ мм.}$

Ответ: тепловой поток $q = 911 \text{ Вт/м}^2$; толщина красного кирпича при отказе от слоя засыпки увеличится до $\delta_3 = 540 \text{ мм}$ вместо 120 мм.

Задача №2. Лучистый теплообмен. Экранирование

Определить удельный лучистый тепловой поток q между двумя параллельно расположенными плоскими стенками, имеющими температуры, t_{w1} и t_{w2} , и степени черноты, ϵ_1 и ϵ_2 , если между ними нет экрана. Определить также удельный тепловой поток при наличии экрана, $q^{\text{э}}$ со степенью черноты, $\epsilon^{\text{э}}$ (см. табл. П.4). Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл.2.

Таблица 2 – Исходные данные к расчету

| Вариант П | ϵ_1 | ϵ_2 | Материал экрана | Вариант ПП | $t_{w1},$ °C | $t_{w2},$ °C |
|-----------|--------------|--------------|------------------------|------------|-----------------|-----------------|
| 0 | 0,5 | 0,6 | Алюминий полиров | 0 | 200 | 30 |
| 1 | 0,55 | 0,52 | Латунь полированная | 1 | 250 | 35 |
| 2 | 0,60 | 0,70 | Хром полированный | 2 | 300 | 25 |
| 3 | 0,52 | 0,72 | Алюминий шероховат. | 3 | 350 | 20 |
| 4 | 0,58 | 0,74 | Латунь прокатная | 4 | 400 | 40 |
| 5 | 0,58 | 0,74 | Хром полированный | 4 | 400 | 40 |
| 6 | 0,70 | 0,58 | Медь полированная | 6 | 500 | 50 |

| Вариант П | ε_1 | ε_2 | Материал экрана | Вариант ПП | $t_{w1},$ °C | $t_{w2},$ °C |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 7 | 0,65 | 0,62 | Алюминий шероховат | 7 | 550 | 55 |
| 8 | 0,75 | 0,73 | Латунь полированная | 8 | 600 | 60 |
| 9 | 0,80 | 0,77 | Сталь полированная | 9 | 650 | 65 |

Пример решения задачи 2.

Сравнить лучистые тепловые потоки между двумя плоскими параллельными поверхностями, разделенными прозрачной средой (воздух), для двух случаев: 1) между поверхностями НЕТ экрана; 2) между поверхностями расположен ОДИН экран.

Температуры поверхностей: $t_{w1}=200$ °C и $t_{w2}=30$ °C; степени черноты поверхностей: $\varepsilon_1=0,65$, $\varepsilon_2=0,7$; материал экрана - латунь листовая прокатная.

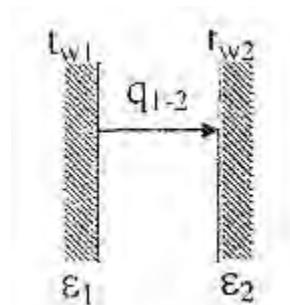


Рис.3. Лучистый теплообмен между поверхностями без экрана

Решение:

1) Между поверхностями НЕТ экрана, рис. 3.

Определяем удельный тепловой поток q_{1-2} , Вт/м², между плоскими поверхностями по формуле:

$$q_{1-2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 [(T_{w1}/100)^4 - (T_{w2}/100)^4] \quad (5)$$

где $C_0=5,67$ Вт/(м²·К⁴) - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; $\varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенная степень черноты поверхностей, участвующих в теплообмене.

Для 2-х параллельно расположенных поверхностей $\varepsilon_{пр}$:

$$\varepsilon_{пр} = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{пр} = 1 / (1/0,65 + 1/0,7 - 1) = 0,51.$$

Подставляем полученное значение $\varepsilon_{пр}$ в формулу теплового потока (5) и получаем:

$$q_{1-2} = 0,51 \cdot 5,67 \cdot [((273+200)/100)^4 - ((273+30)/100)^4] = 1203 \text{ Вт/м}^2.$$

2) Между поверхностями расположен ОДИН экран (рис.4):

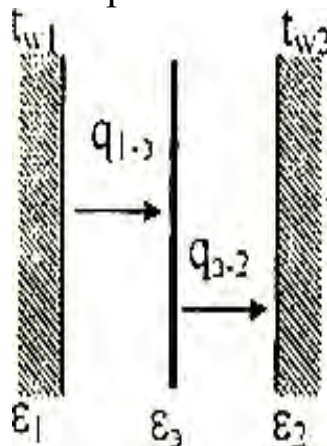


Рис.4. Лучистый теплообмен между поверхностями с одним экраном

При установившихся условиях

$$q_{1-3} = q_{3-2} = q_{1-3-2} \equiv q_{1-2}^э,$$

где $q_{1-2}^э$ - тепловой поток между 1-ой и 2-ой поверхностями при наличии экрана.

Тепловой поток при наличии экрана $q_{1-2}^э$, Вт/м²:

$$q_{1-2}^э = \varepsilon_{пр}^э C_0 [(T_{w1}/100)^4 - (T_{w2}/100)^4] \quad (7)$$

где $\varepsilon_{пр}^э$ - приведенная степень черноты поверхностей, участвующих в теплообмене, при наличии между ними экрана (одного или нескольких).

Если число плоских экранов n , приведенную степень черноты $\varepsilon_{пр}^э$ считают по формуле:

$$\varepsilon_{пр}^э = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 + 2 \cdot \sum \varepsilon_i^э - (n+1)). \quad (8)$$

В данной задаче один экран, т.е. $n=1$. Степень черноты экрана выбираем по табл. П 4, следовательно, для латуни листовой прокатной $\varepsilon^э = 0,06$.

Подставляем в формулу $\varepsilon_{\text{пр}}^3$ значения $n=1$ и $\varepsilon^3=0,06$ и получаем:

$$\varepsilon_{\text{пр}}^3 = 1 / (1/0,65 + 1/0,7 + 2 - 1/0,06 - (1+1)) = 0,029.$$

Тепловой поток при наличии экрана

$$q_{1-2}^3 = 0,029 \cdot 5,67 \cdot [((273+200)/100)^4 - ((273+30)/100)^4] = 68,44 \text{ Вт/м}^2.$$

Ответ: без экрана между поверхностями тепловой поток $q_{1-2} = 1203 \text{ Вт/м}^2$; при наличии одного экрана между поверхностями тепловой поток составляет $q_{1-2}^3 = 68,44 \text{ Вт/м}^2$, т.е. тепловой поток при установке экрана уменьшился в $1203/68,44 = 18$ раз.

Задача №3. Сложный теплообмен

Определить потери теплоты конвекцией и излучением (отдельно) за сутки горизонтально расположенного трубопровода диаметром d мм и длиной l м, охлаждаемого свободным потоком воздуха, если температура поверхности трубопровода, t_w температура воздуха в помещении, t_f (степень черноты трубы ε см. табл. П.4). Данные, необходимые для решения задачи, взять из табл.3.

Таблица 3 – Исходные данные к расчету

| Вариант П | d , мм | ε , м | Вариант ПП | t_w , °С | t_f , °С | Поверхность трубы |
|-----------|----------|-------------------|------------|------------|------------|---------------------|
| 0 | 230 | 3 | 0 | 150 | 15 | Жесть белая старая |
| 1 | 220 | 5 | 1 | 140 | 20 | Асбестовый картон |
| 2 | 250 | 7 | 2 | 130 | 25 | Лак белый |
| 3 | 240 | 9 | 3 | 120 | 35 | Лак черный матовый |
| 4 | 210 | 11 | 4 | 110 | 25 | Железо оцинкованное |
| 5 | 270 | 6 | 5 | 100 | 20 | Масляная краска |
| 6 | 340 | 4 | 6 | 190 | 15 | Сталь шероховатая |
| 7 | 320 | 12 | 7 | 180 | 10 | Алюминиевая краска |
| 8 | 360 | 8 | 8 | 170 | 5 | Сталь окисленная |
| 9 | 300 | 10 | 9 | 160 | 0 | Чугун шероховатый |

Пример решения задачи 3.

В цеховом помещении, где температура воздуха и стен $t_t=20$ °С, расположена труба наружным диаметром $d=320$ мм и длиной 10 м. Труба имеет температуру на поверхности $t_w=140$ °С и охлаждается за счет излучения и свободного движения воздуха. (Поверхность трубы - лак черный матовый). Определить тепловые потери трубой за сутки отдельно конвекцией и излучением (см.рис 5).

Решение:

Общие тепловые потери Q , Вт, трубы составляют:

$$Q = Q_k + Q_l, \quad (9)$$

где Q_k - тепловые потери за счет конвекции; Q_l - тепловые потери за счет излучения.

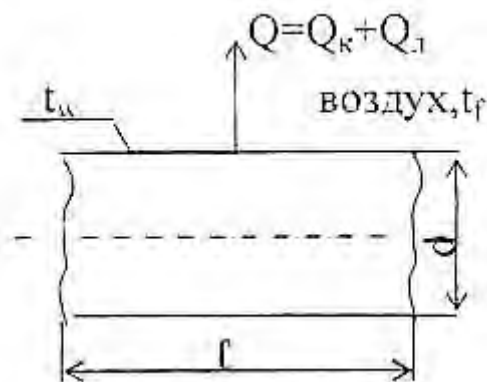


Рис. 5. Расчетная схема для определения сложной теплоотдачи конвекцией и излучением

Решение задачи состоит из двух частей.

А) Тепловые потери за счет свободного движения воздуха у горячей трубы

Конвективная составляющая общих тепловых потерь Q_k , Вт, определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$Q_k = \alpha(t_w - t_t) \cdot F, \quad (10)$$

где α - коэффициент теплоотдачи при свободном движении воздуха, Вт/(м²·К); $F = \pi \cdot d \cdot l$ - поверхность трубы, м².

Коэффициент теплоотдачи для горизонтальной трубы определяется по критериальному уравнению:

$$Nu_f = 0,5 \cdot (Pr \cdot Gr)_f^{0,25} (Pr_f/Pr_w)^{0,25}, \quad (12)$$

где $Nu_f = \alpha \cdot d / \lambda_f$ - критерий Нуссельта.

Определяющей температурой в критериальном уравнении (12) является температура окружающей среды t_f ; определяющим размером - наружный диаметр трубы d .

1) Свойства воздуха при температуре $t_f = 20$ °С выбираем по таблице теплофизических свойств воздуха, табл. П. 1.

$\lambda = 0,0259$ Вт/(м·К) - коэффициент теплопроводности воздуха;

$\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с - коэффициент кинематической вязкости воздуха;

$Pr_f = 0,703$ - критерий Прандтля для воздуха.

2) Критерий Грасгофа:

$$Gr = g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot \Delta t / \nu^2,$$

(13)

где $\beta = 1/(273 + t_f)$, 1/К - коэффициент объемного расширения воздуха; $\beta = 1/(273 + 20) = 0,0034$ К⁻¹;

$\Delta t = (t_w - t_f) = 140 - 20 = 120$ °С;

$g = 9,81$ м/с² - ускорение силы тяжести.

Считаем критерий Грасгофа:

$$Gr = [9,81 \cdot 0,32^3 \cdot 0,0034 \cdot 120] / (15,06 \cdot 10^{-6})^2 = 5,81 \cdot 10^8.$$

3) Отношение Pr/Pr_w для газов равняется 1, т.е. $Pr_f/Pr_w = 1$.

4) Решаем критериальное уравнение

$$Nu_f = 0,5 \cdot (Pr \cdot Gr)_f^{0,25} = 0,5 (0,703 \cdot 5,81 \cdot 10^8)^{0,25} = 71,06.$$

5) Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·К):

$$\alpha = Nu_f \cdot \lambda_f / d = 71,06 \cdot 0,0259 / 0,32 = 5,75.$$

6) Тепловые потери за счет свободного движения воздуха:

$$Q_K = \alpha (t_w - t_f) F = 5,75 (140 - 20) \cdot 3,14 \cdot 0,32 \cdot 10 = 6933 \text{ Вт}$$

Это потери тепла в секунду (Вт=Дж/с). За сутки потери тепла составят $Q_K^{сут} = Q_K \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 6933 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 599000$ кДж. (Множитель 10^{-3} означает перевод размерности Дж в кДж.)

Первая часть задачи закончена.

В) Тепловые потери за счет излучения определяем по формуле:

$$Q_{л} = \varepsilon_{пр} C_0 [(T_w/100)^4 - (T_f/100)^4] \cdot F, \text{ Вт}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{пр}$ - приведенная степень черноты.

При условии, что поверхность трубы много меньше поверхности стен в цехе $\varepsilon_{пр}=\varepsilon_w$.

По таблице П.4 выбираем для поверхности (лак черный матовый) $\varepsilon_w=0,96$.

Подставляем исходные данные в формулу (14):

$$Q_{л}=0,96 \cdot 5,67 \cdot [((273+140)/100)^4 - ((273+20)/100)^4] \cdot 3,14 \cdot 0,32 \cdot 10 = 11880 \text{ Вт, (Дж/с)}$$

За сутки потери тепла составят:

$$Q_{л}^{сут} = Q_{л} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 11880 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 1027000 \text{ кДж}$$

Ответ: потери тепла горячей трубой за сутки составляют: конвективным путем 599000 кДж; лучистым путем 1027000 кДж.

Задача №4. Теплопередача

По горизонтально расположенной стальной трубе [$\lambda=20$ Вт/(м·К)] со скоростью w , м/с течёт вода, имеющая температуру, t_1 . Снаружи труба охлаждается окружающим воздухом, температура которого, t_2 . Определить коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 , соответственно, от воды к внутренней стенке трубы и от наружной стенки трубы к воздуху, а также коэффициент теплопередачи и тепловой поток q , отнесённый к 1 м длины трубы, если внутренний диаметр трубы равен d_1 , внешний – d_2 . Данные, необходимые для решения задачи, взять из табл. 4.

При определении α_1 и α_2 принять температуру поверхностей трубы t_w , равной $t_w=(t_1+t_2)/2$.

Таблица 4 – Исходные данные к расчету

| Вариант П | t_1 °C | W , м/с | Вариант ПП | t_2 , °C | d_1 , мм | d_2 ,мм |
|--------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 0 | 140 | 0,25 | 0 | 18 | 190 | 210 |
| 1 | 150 | 0,36 | 1 | 16 | 180 | 200 |
| 2 | 120 | 0,27 | 2 | 14 | 170 | 190 |
| 3 | 160 | 0,38 | 3 | 12 | 160 | 180 |
| 4 | 150 | 0,19 | 4 | 10 | 150 | 170 |
| 5 | 190 | 0,21 | 5 | 8 | 140 | 160 |
| 6 | 170 | 0,23 | 6 | 6 | 130 | 150 |
| 7 | 210 | 0,42 | 7 | 4 | 120 | 140 |

| | | | | | | |
|---|-----|------|---|---|-----|-----|
| 8 | 200 | 0,43 | 8 | 2 | 110 | 130 |
| 9 | 220 | 0,44 | 9 | 0 | 100 | 120 |

Пример решения задачи 4.

По горизонтальной трубе внутренним диаметром $d_1=180$ мм течет вода со скоростью $w=0,4$ м/с. Средняя температура воды $t_1=200$ °С. Снаружи труба охлаждается воздухом, температура которого! $t_2=20$ °С. Труба стальная (сталь 20), наружный диаметр трубы $d_2=200$ мм (см. рис.6).

Определить:

А) коэффициент теплоотдачи α_1 от воды к внутренней стенке трубы;

Б) коэффициент теплоотдачи α_2 от наружной поверхности трубы к воздуху;

В) коэффициент теплопередачи K_l и тепловой поток q_l от воды к воздуху через стенку, отнесенной к 1 м длины трубы.

Задачу выполнить по формулам для цилиндрической стенки.

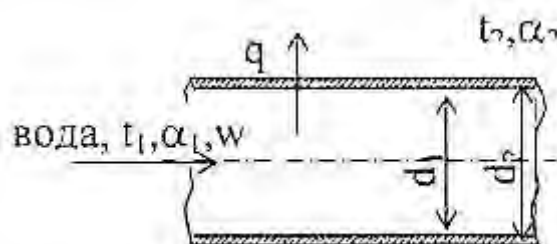


Рис. 6. Расчетная схема теплопередачи через цилиндрическую стенку

Решение:

А) Определение коэффициента теплоотдачи от воды к внутренней стенке трубы α_1 .

Внутри трубы вода движется с заданной скоростью, следовательно, тепловой поток от воды к трубе отдается вынужденной конвекцией.

1) Свойства воды при температуре $t_1=200$ °С (выбираем по таблице физических свойств воды, табл. П 2):

$\lambda_1 = 0,663$ Вт/(м·К) - коэффициент теплопроводности воды;

$\nu_1 = 0,158 \cdot 10^{-6}$ м²/с - коэффициент кинематической вязкости

ВОДЫ;

$Pr_1=0,93$ - критерий Прандтля при температуре воды $t_1=200$ °С;

$Pr_w=1,6$ - критерий Прандтля для воды при температуре стенки трубы (температуру стенки трубы принимаем равной среднеарифметическому значению температур воды и воздуха):

$$t_w=0,5(t_1+t_2)=0,5(200+20)=110^\circ\text{C}.$$

2) Критерий Рейнольдса:

$$Re_1=w \cdot d_1 / \nu_1 \quad (15)$$

$$Re_1=0,4 \cdot 0,18 / (0,158 \cdot 10^{-6})=455700.$$

3) Выбор критериального уравнения

Вид критериального уравнения зависит от режима движения теплоносителя. При турбулентном режиме движения теплоносителя в трубе ($Re > 10000$) критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu_1=0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot (Pr_1/Pr_w)^{0,25}. \quad (16)$$

При ламинарном режиме движения жидкости в трубе ($Re \leq 2300$) критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu_1=0,15 \cdot Re_1^{0,33} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot (Pr_1/Pr_w)^{0,25}. \quad (17)$$

При переходном режиме ($2300 \leq Re < 10000$):

$$Nu_1=0,008 Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} (Pr_1/Pr_w)^{0,25}. \quad (18)$$

В данной задаче режим движения воды в трубе турбулентный, т.к. полученное значение $Re > 10000$, поэтому используем формулу (16).

4) Подставляем имеющиеся исходные и полученные данные в критериальное уравнение (16) для турбулентного режима движения и получаем:

$$\begin{aligned} Nu_1 &= 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot (Pr_1/Pr_w)^{0,25} = \\ &= 0,021 \cdot 455700^{0,8} \cdot 0,93^{0,43} \cdot (0,93/1,6)^{0,25} = 596. \end{aligned}$$

5) Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = Nu_1 \cdot \lambda_1 / d_1 = 596 \cdot 0,663 / 0,18 = 2200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Б) Определение коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности трубы к воздуху α_2 .

Снаружи труба омывается свободно движущимся воздухом. Следовательно, имеет место теплообмен при свободной конвекции.

Критериальное уравнение для горизонтальной трубы при свободном движении воздуха

$$Nu_2 = 0,5(Pr \cdot Gr)_2^{0,25} \quad (18)$$

б) Свойства воздуха при температуре $t=20$ °С (выбираем по таблице физических свойств воздуха, табл. П.1)

$\lambda_2 = 0,0259$ Вт/(м·К) - коэффициент теплопроводности воздуха;

$\nu_2 = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с - коэффициент кинематической вязкости

воздуха; $Pr_2 = 0,703$ - критерий Прандтля для воздуха.

7) Критерий Грасгофа:

$$Gr_2 = g \cdot d_2^3 \cdot \beta \cdot (t_w - t_2) / \nu_2^2 \quad (19)$$

$$Gr_2 = 9,81 \cdot 0,2^3 \cdot [1/(273+20)] \cdot (110 - 20) / (15,06 \cdot 10^{-6})^2 = 1,06 \cdot 10^8$$

8) Решение критериального уравнения:

$$Nu_2 = 0,5 \cdot (Pr \cdot Gr)_2^{0,25} = 0,5 \cdot (0,703 \cdot 1,06 \cdot 10^8)^{0,25} = 46,46$$

9) Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = Nu_2 \cdot \lambda_2 / d_2 \quad (20)$$

$$\alpha_2 = 46,46 \cdot 0,0259 / 0,2 = 6,00 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

В) Определение коэффициента теплопередачи.

10) По условию задачи коэффициент теплопередачи и тепловой поток следует определять по формулам для криволинейных поверхностей, следовательно, линейный коэффициент теплопередачи будет равен:

$$K_l = 1 / [1/(\alpha_1 \cdot d_1) + (1/2\lambda) \cdot \ln(d_2/d_1) + 1/(\alpha_2 \cdot d_2)], \quad (21)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала трубы (сталь 20) выбираем по табл. П.3 $\lambda = 51$ Вт/(м·К):

$$K_l = 1 / [1/(2200 \cdot 0,18) + (1/(2 \cdot 51)) \cdot \ln(0,2/0,18) + 1/(6,00 \cdot 0,2)] = 1,20 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

11) Линейный тепловой поток q_l , Вт/м:

$$q_l = \pi \cdot K_l \cdot (t_1 - t_2) \quad (22)$$

Подставляем известные данные в это уравнение и получаем

$$q_l = 3,14 \cdot 1,20 \cdot (200 - 20) = 678 \text{ Вт/м}.$$

Ответ: коэффициенты теплоотдачи: от воды к внутренней

поверхности трубы $\alpha_1=2200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; от наружной поверхности трубы к воздуху $\alpha_2=6,00 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

линейный коэффициент теплопередачи $K_f=1,20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

линейный тепловой поток $q_l=678 \text{ Вт}/\text{м}$.

Задача №5. Расчет теплообменного аппарата

Водовоздушный нагреватель выполнен из труб диаметром 38x3 мм. Греющая среда - воздух, подается в межтрубное пространство с температурой t_1' . На выходе из аппарата температура воздуха t_2' . По трубам протекает нагреваемая вода расходом G_2 т/ч с начальной температурой t_2' и конечной t_2'' . Коэффициенты теплоотдачи от воздуха к трубам α_1 и от труб к воде α_2 .

Определить поверхность нагрева аппарата, если он подключен по прямоточной и противоточной схемам. Учесть загрязнения поверхности труб: с одной стороны - слоем масла толщиной 0,1 мм и с другой - накипью толщиной 0,5 мм. Теплопроводность масла $\lambda_m=0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, накипи - $\lambda_n=1,75 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Теплопроводность материала труб приведена в табл. 5.

Кривизной стенки трубы можно пренебречь. Учесть потери тепла в окружающую среду, которые составляют 5% теплоты, получаемой водой ($Q_{\text{пот.}}=0,05 \times Q_2$). Данные для решения задачи взять из табл. 5.

Таблица 5 – Исходные данные к расчету

| Вариант П | Материал труб | t_1' °С | t_1'' °С | t_2' °С | t_2'' °С | Вариант ПП | G_2 , т/ч | α_1 , Вт/(м ² ·К) | α_2 , Вт/(м ² ·К) |
|-----------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|------------|----------------|--|--|
| 0 | Латунь | 340 | 280 | 20 | 150 | 0 | 1,8 | 45 | 2400 |
| 1 | Алюминий | 350 | 250 | 30 | 200 | 1 | 2,0 | 30 | 2200 |
| 2 | Титан | 380 | 200 | 40 | 150 | 2 | 4,0 | 40 | 3400 |
| 3 | Латунь | 400 | 300 | 50 | 120 | 3 | 6,0 | 50 | 4100 |
| 4 | Медь | 420 | 280 | 55 | 180 | 4 | 8,0 | 60 | 5500 |
| 5 | Сталь 20 | 450 | 280 | 60 | 190 | 5 | 2,5 | 65 | 6300 |
| 6 | Нержавеющая | 270 | 200 | 65 | 140 | 6 | 5,0 | 35 | 3500 |

| | | | | | | | | | |
|---|----------|-----|-----|----|-----|---|-----|----|------|
| | сталь | | | | | | | | |
| 7 | Латунь | 360 | 220 | 70 | 170 | 7 | 3,5 | 45 | 2500 |
| 8 | Медь | 500 | 350 | 80 | 215 | 8 | 3,0 | 55 | 4500 |
| 9 | Сталь 45 | 300 | 190 | 75 | 160 | 9 | 3,2 | 36 | 3200 |

Пример решения задачи 5.

Водовоздушный нагреватель выполнен из труб диаметром 38x3 мм, материал труб - сталь 20. Греющая среда - воздух, подается в межтрубное пространство аппарата с температурой $t_1' = 400$ °С. На выходе из аппарата температура воздуха $t_1'' = 280$ °С. По трубам протекает нагреваемая вода расходом $G_2 = 3,5$ т/ч с начальной температурой $t_2' = 10$ °С и конечной $t_2'' = 180$ °С.

Коэффициенты теплоотдачи от воздуха к трубам – $\alpha_1 = 50$ Вт/(м²·К) и от труб к воде - $\alpha_2 = 4100$ Вт/(м²·К).

Определить поверхность нагрева аппарата, если он выполнен по прямоточной и противоточной схемам. Учесть загрязнения поверхностей труб: с одной стороны слоем масла толщиной 0,1 мм, [$\lambda_m = 1,15$ Вт/(м·К)] и с другой – накипью толщиной 0,5 мм, [$\lambda_n = 1,75$ Вт/(м·К)]. Кривизной стенки трубы можно пренебречь. При расчете учесть потери тепла в окружающую среду, которые составляют 5% теплоты, получаемой водой.

Решение:

По условию задачи выполняем расчетную схему аппарата, рис.7. На расчетной схеме аппарата наносим все известные материальные потоки и их температуры.

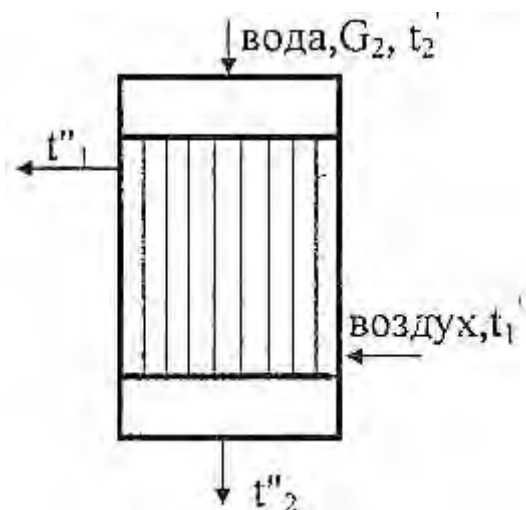


Рис. 7. Расчетная схема теплообменного аппарата

Искомая поверхность теплопередачи определяется по формуле:

$$F=Q/(K \cdot \Delta t_{cp}), \quad (23)$$

где Q - тепловой поток, передаваемый от горячего воздуха к воде, Вт;

K - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

Δt_{cp} - средняя разность температур между воздухом и водой, °С.

1) Определяем тепловой поток Q , Вт, из уравнения теплового баланса:

$$Q=Q_1= Q_2 + Q_{пот}, \quad (24)$$

где Q_1 - тепловой поток, передаваемый воздухом воде, Вт;

Q_2 - тепловой поток, который принимает вода, Вт;

$Q_{пот}$ - тепловые потери аппаратом в окружающую среду, Вт.

По условию задачи потери тепла составляют 5% от Q_2 , т.е. $Q_{пот}=0,05 \cdot Q_2$. Окончательно уравнение теплового баланса принимает вид $Q= Q_1=1,05Q_2$.

Тепловой поток определяем по правой части уравнения теплового баланса, Вт:

$$Q=1,05Q_2= 1,05 \cdot G_2 \quad c_2 \cdot (t_2'' - t_2'), \quad (25)$$

где G_2 - расход воды, кг/с; $G_2=3,5 \cdot 1000/3600=0,9722$ кг/с (расход в т/ч переводим в кг/с);

$c_2=4,211$ кДж/(кг·К)=4211 Дж/(кг·К) - теплоемкость воды, выбираем по таблице физических свойств воды, табл. П.2, по средней температуре воды $t_2=0,5(t_2'+t_2'')=0,5(10+180)=95^\circ\text{C}$.

Подставляем подготовленные величины в уравнение теплового баланса и получаем:

$$Q=1,05 \cdot 0,9722 \cdot 4211(180-10)=730800 \text{ Вт.}$$

2) Коэффициент теплопередачи K определяем по формуле для трехслойной плоской стенки, Вт/(м²·К):

$$K=1 / (1 / \alpha_1 + \delta_m / \lambda_m + \delta / \lambda + \delta_n / \lambda_n + 1 / \alpha_2), \quad (26)$$

где δ и λ - толщина стенки трубы (м) и коэффициент теплопроводности материала трубы (Вт/(м·К), соответственно.

По условию задачи размер трубы 38x3, следовательно, толщина трубы $\delta=3$ мм=0,003 м; теплопроводность материала трубы (сталь 20) выбираем по табл. П.3 $\lambda=51$ Вт/(м·К).

Таким образом,

$$K=1/(1/50+0,0001/1,15+0,003/51+0,0005/1,75+1/4100)=48,36 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$$

3) Определяем средний температурный напор для прямоточной схемы движения воздуха и воды и поверхность теплопередачи.

Прямоточная схема движения представлена на рис.8.

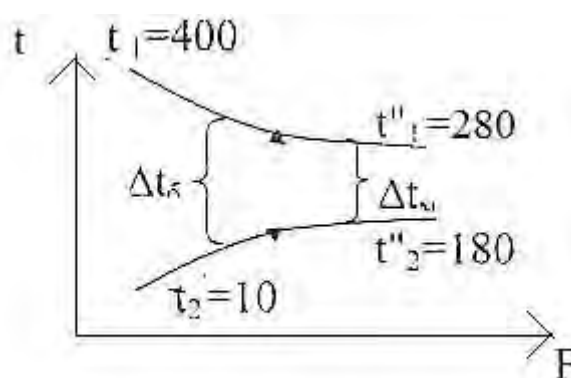


Рис.8. Прямоточная схема движения теплоносителей.

Находим большую (Δt_{δ}) и меньшую ($\Delta t_{\text{м}}$) разности температур между воздухом и водой на одном конце аппарата и на другом.

$$\Delta t_{\delta}=400 - 10=390 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta t_{\text{м}}=280 - 180=100 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$\Delta t_{\delta}/\Delta t_{\text{м}}=(390/100)>2$, следовательно, средний температурный напор определяем как среднелогарифмический по формуле:

$$\Delta t_{\text{ср.}(прям)} = (\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}) / \ln (\Delta t_{\delta}/\Delta t_{\text{м}}) \quad (27)$$

$$\Delta t_{\text{ср.}(прям)} = (390 - 100) / \ln (390/100) = 213 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

4) Поверхность теплопередачи при прямотоке равна, м²:

$$F_{\text{прям}}=Q / K \cdot \Delta t_{\text{ср.}(прям)} = 730800/(48,36 - 213)=70,86 \text{ м}^2. \quad (28)$$

4) Определяем средний температурный напор для

противоточной схемы движения воздуха и воды и поверхность теплопередачи.

Противоточная схема движения представлена на рис.9.

Находим большую (Δt_{δ}) и меньшую (Δt_{μ}) разности температур между воздухом и водой на одном конце аппарата и на другом:

$$\Delta t_{\delta} = 280 - 10 = 270 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta t_{\mu} = 400 - 180 = 220 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

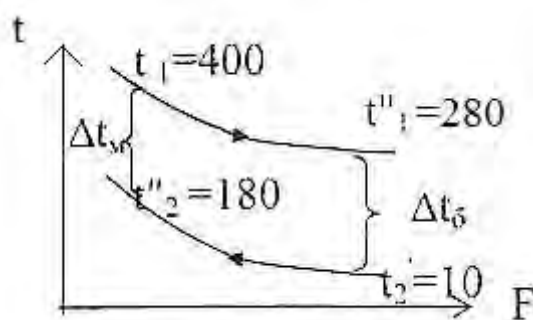


Рис.9. Противоточная схема движения теплоносителей.

$\Delta t_{\delta} / \Delta t_{\mu} = (270 / 220) < 2$, следовательно, средний температурный напор определяем как среднеарифметический по формуле:

$$\Delta t_{ср.(против)} = 0,5(\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\mu}) \quad (29)$$

$$\Delta t_{ср.(против)} = 0,5(270 + 220) = 245 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

5) Поверхность теплопередачи при противотоке равна, м^2 :

$$F_{против} = Q / (K \cdot \Delta t_{ср.(против)}) \quad (30)$$

$$F_{против} = 730800 / (48,36 \cdot 245) = 61,67 \text{ м}^2.$$

Вывод: средняя разность температур при противотоке больше средней разности температур при прямотоке, $\Delta t_{ср.(против)} > \Delta t_{ср.(прям)}$.

Следовательно, поверхность теплопередачи при противотоке меньше, чем при прямотоке, $F_{против} < F_{прям}$.

Ответ: поверхности теплопередачи водовоздушного нагревателя составляют: $F_{прям} = 70,86 \text{ м}^2$, $F_{против} = 61,67 \text{ м}^2$.

Задача №6. Процессы массообмена

Вычислить коэффициент массоотдачи в процессе сушки песка в воздушной конвективной сушилке. Сушильный агент - воздух с параметрами по психрометру t_c , °C и t_m , °C перемещается вдоль поверхности испарения со скоростью w , м/с. Давление воздуха в сушилке P , мм рт.ст., длина поверхности испарения L , м.

Примечание: При решении задачи принять:

1) коэффициент диффузии $D_0 = 21,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при нормальных физических условиях;

2) критериальное уравнение для процесса сушки $Nu_D = C \cdot Re^n \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Gu^{0,135}$.

Данные для решения задачи взять из табл.6 и 7.

Таблица 6 – Исходные данные к расчету

| Вариант П | Показание психрометра | | P, мм рт.ст. | Вариант ПП | W, м/с | ε, м |
|--------------|-----------------------|------------|-----------------|---------------|--------|------|
| | t_c , °C | t_m , °C | | | | |
| 0 | 30 | 15 | 735 | 0 | 1,20 | 0,90 |
| 1 | 35 | 20 | 740 | 1 | 1,30 | 0,80 |
| 2 | 40 | 25 | 775 | 2 | 1,40 | 0,70 |
| 3 | 34 | 20 | 750 | 3 | 1,50 | 0,75 |
| 4 | 36 | 22 | 760 | 4 | 1,60 | 0,65 |
| 5 | 32 | 18 | 765 | 5 | 1,70 | 0,60 |
| 6 | 42 | 22 | 780 | 6 | 1,25 | 0,85 |
| 7 | 45 | 25 | 785 | 7 | 1,35 | 0,85 |
| 8 | 38 | 24 | 735 | 8 | 1,45 | 0,75 |
| 9 | 40 | 22 | 785 | 9 | 1,55 | 0,70 |

Таблица 7 – Значения коэффициентов C и n в критериальном уравнении для сушки материалов

| Коэффициенты | Критерий Рейнольдса, Re | | |
|--------------|-------------------------|------------|-------------|
| | 1 ÷ 200 | 200 ÷ 6000 | 600 ÷ 70000 |
| C | 0,9 | 0,87 | 0,35 |
| n | 0,5 | 0,54 | 0,65 |

Пример решения задачи 6.

Определить коэффициент массоотдачи в процессе высушивания влажного материала воздухом под давлением 780 мм рт.ст., движущимся со скоростью 1,8 м/с над поверхностью испарения, длина которой 0,6 м. Показания психрометра: $t_c=32$ °С, $t_m=18$ °С.

При расчете принять 1) коэффициент диффузии $D_0=21,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с при нормальных физических условиях; 2) критериальное уравнение для сушки материалов $Nu_D=C \cdot Re^n \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Gu^{0,135}$.

Решение:

Коэффициент массоотдачи β определяем по критериальному уравнению для сушки материалов:

$$Nu_D=C \cdot Re^n \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Gu^{0,135}, \quad (31)$$

где $Nu_D=\beta \cdot l / D$ - диффузионный критерий Нуссельта;

$Re=\omega \cdot l / \nu$ - критерий Рейнольдса;

$Pr_D=\nu / D$ - диффузионный критерий Прандтля;

$Gu=(T_c - T_m)/T_c$ - критерий Гухмана.

Определяющим размером в данном уравнении является длина поверхности испарения l , определяющей температурой - температура воздуха t_c .

1) По температуре воздуха $t_c=32$ °С по табл. П.1 выбираем коэффициент кинематической вязкости воздуха $\nu=16 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

2) Вычисляем критерий Рейнольдса:

$$Re=\omega \cdot l / \nu=1,8 \cdot 0,6 / 16 \cdot 10^{-6}=67500.$$

По табл. П.8 этому значению критерия Re соответствуют коэффициенты: $C=0,35$; $n=0,65$.

3) Приводим значение коэффициента диффузии D_0 , заданного при нормальных условиях, к условиям сушки:

$$D=D_0 \cdot (P_0/P) \cdot [(273+t_c)/273]^{1+n}, \quad (32)$$

где P_0 - давление при нормальных условиях ($P_0=760$ мм рт.ст.);

n - показатель степени, который зависит от состава газовой смеси над материалом. Для смеси водяного пара и воздуха $n=0,8$.

$$D=21,6 \cdot 10^{-6} \cdot (760/780) \cdot [(273+32)/273]^{1+0,8}=0,26 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

4) Диффузионный критерий Прандтля:

$$Pr_0 = v/D = 16 \cdot 10^{-6} / 0,26 \cdot 10^{-4} = 0,615. \quad (33)$$

5) Критерий Гухмана:

$$Gu = (T_c - T_m) / T_c = [(273+32) - (273+18)] / (273+32) = 0,0459. \quad (34)$$

6) Критерий Нуссельта определяем по формуле (31):

$$Nu_D = C \cdot Re^n \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Gu^{0,135} = 0,35 \cdot 67500^{0,65} \cdot 0,615^{0,33} \cdot 0,0459^{0,135} = 271.$$

7) Коэффициент массоотдачи:

$$\beta = Nu_D \cdot D / l = 271 \cdot 0,26 \cdot 10^{-4} / 0,6 = 0,0117 \quad \text{м/с.} \quad (35)$$

Ответ: коэффициент массоотдачи $\beta = 0,0117$ м/с.

Контрольные вопросы

Таблица 8 – Таблица номеров контрольных вопросов

| Вариант II | №№ контрольных вопросов | Вариант III | №№ контрольных вопросов |
|---------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|
| 0 | 1,45 | 0 | 11,31 |
| 1 | 2,28 | 1 | 12,41 |
| 2 | 3,29 | 2 | 13,42 |
| 3 | 4,30 | 3 | 14,43 |
| 4 | 5,44 | 4 | 15,35 |
| 5 | 6,25 | 5 | 16,36 |
| 6 | 7,24 | 6 | 17,37 |
| 7 | 8,22 | 7 | 18,38 |
| 8 | 23,20 | 8 | 19,39 |
| 9 | 10,21 | 9 | 17,40 |

Вопросы

1. Понятия, обозначения и размерности полного теплового потока, удельного теплового потока (плотности теплового потока) и линейного теплового потока.
2. Температурное поле; одно-, двух- и трехмерные температурные поля; стационарное и нестационарные температурные поля.
3. Краткая характеристика 3-х механизмов переноса тепла: теплопроводностью, конвекцией и излучением.
4. Закон Фурье, коэффициент теплопроводности, его физический смысл, размерность.
5. Передача тепла теплопроводностью через плоскую однослойную и многослойную стенку, термические сопротивления, схема изменения температур по слоям.
6. Передача тепла теплопроводностью через цилиндрическую однослойную стенку, термическое сопротивление, схема изменения температуры в слое.
7. Передача тепла теплопроводностью через цилиндрическую многослойную стенку, термическое сопротивление, схема изменения температур по слоям.
8. Уравнение теплопроводности для плоской стенки с внутренним источником тепла.
9. Основные положения теплопроводности при нестационарных условиях.
10. Теплообмен излучением. Его физическая сущность.
11. Основные понятия лучистого теплообмена: лучистый тепловой поток, излучательная способность тела. Понятия абсолютно черного, абсолютно белого, абсолютно прозрачного и серого тел.
12. Законы лучистого теплообмена: закон Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта.
13. Теплообмен излучением между двумя плоскими параллельными поверхностями.
14. Теплообмен излучением между телами, когда одно тело находится внутри другого.
15. Использование экранов для защиты от излучения.
16. Излучение газов, особенности.
17. Конвективный теплообмен. Его физическая сущность.

Основные понятия конвективного теплообмена: теплоноситель, свободное и вынужденное движения теплоносителей, факторы, влияющие на интенсивность теплообмена.

18. Понятие о гидродинамическом и тепловом пограничных слоях.

19. Основное уравнение конвективного теплообмена (уравнение Ньютона-Рихмана). Коэффициент теплоотдачи, его физический смысл, размерность.

20. Применение теории подобия при изучении процессов теплоотдачи.

21. Критерии теплового подобия. Критериальные уравнения конвективного теплообмена.

22. Теплоотдача при свободной конвекции в неограниченном пространстве. Режимы свободной конвекции. Критериальное уравнение. Факторы, влияющие на интенсивность теплообмена.

23. Теплоотдача при свободной конвекции в щелях и прослойках. Расчетные уравнения.

24. Теплоотдача при вынужденном движении теплоносителя внутри трубы. Режимы движения. Критериальные уравнения.

25. Теплоотдача при поперечном обтекании единичной трубы и пучка труб. Расчетные уравнения.

26. Теплоотдача при конденсации паров. Механизм конденсации, расчетные уравнения коэффициента теплоотдачи.

27. Теплоотдача при кипении жидкостей. Механизм кипения, расчетные уравнения коэффициента теплоотдачи.

28. Сложный теплообмен.

29. Теплопередача. Физическая сущность процесса. Уравнение теплопередачи, коэффициент теплопередачи.

30. Теплопередача через плоскую однослойную стенку. Уравнение теплопередачи, коэффициент теплопередачи, термическое сопротивление теплопередачи. Схема распределения температур.

31. Теплопередача через плоскую многослойную стенку. Уравнение теплопередачи, коэффициент теплопередачи, термическое сопротивление теплопередачи. Схема распределения температур.

32. Теплопередача через цилиндрическую однослойную стенку. Уравнение теплопередачи, линейный коэффициент теплопередачи, линейное термическое сопротивление теплопередачи.

Схема распределения температур.

33. Теплопередача через цилиндрическую многослойную стенку. Уравнение теплопередачи, линейный коэффициент теплопередачи. Схема распределения температур.

34. Интенсификация процессов теплопередачи.

35. Тепловая изоляция. Понятие критического диаметра изоляции.

36. Теплообменные аппараты. Классификация.

37. Рекуперативные теплообменные аппараты. Классификация, краткая характеристика.

38. Расчетные уравнения процесса теплопередачи: уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи.

39. Виды теплового расчета теплообменных аппаратов.

40. Схемы движения теплоносителей в теплообменных аппаратах. Анализ.

41. Средний температурный напор в теплообменных аппаратах; его определение при прямоточной, противоточной и других схемах движения теплоносителей.

42. Массообмен. Основные понятия массообмена.

43. Примеры массообменных процессов. Их краткая характеристика.

44. Массоотдача и массопередача. Краткая характеристика.

45. Аналогия процессов тепло- и массообмена.

Библиографический список

1. Теплотехника [Текст] : учебник / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : БАСТЕТ, 2010. - 328 с.
2. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст] : учебное пособие / под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - М. : Академия, 2008. - 272 с.
3. Примеры и задачи по тепломассообмену [Текст] : [учебное пособие] / В. С. Логинов [и др.]. - Изд. 2-е, испр. и доп. - Санкт-Петербург : Лань , 2011. - 256 с.
4. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст] : учебное пособие / под ред. А.А. Захаровой. - М.: Академия, 2006. - 272 с.
5. Брюханов О. Н. Основы гидравлики и теплотехники: [Текст]: учебник / О. Н. Брюханов, А. Т. Мелик-Аракелян, В. И. Коробко. - 2-е изд., стер. - М.: Академия, 2006. - 240 с.
6. Теплотехника [Текст]: учебник / Под ред. В. Н. Луканина. - 4-е изд., испр. - М.: Высшая школа, 2003. - 671 с.

Приложения

Таблица П.1 – Физические свойства сухого воздуха при давлении
 $P=1,013 \cdot 10^3$ Па

| t, °C | ρ , кг/м ³ . | C_p , кДж/(кг·К) | λ Вт/(м·К) | $\nu \cdot 10^6$, м ² /с | Pr |
|----------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|-------|
| -50 | 1,584 | 1,013 | 0,0204 | 9,23 | 0,728 |
| -40 | 1,515 | 1,013 | 0,0212 | 10,04 | 0,728 |
| -30 | 1,453 | 1,013 | 0,0220 | 10,80 | 0,723 |
| -20 | 1,395 | 1,009 | 0,0228 | 11,79 | 0,716 |
| -10 | 1,342 | 1,009 | 0,0236 | 12,43 | 0,712 |
| 0 | 1,293 | 1,005 | 0,0244 | 13,28 | 0,707 |
| 10 | 1,247 | 1,005 | 0,0251 | 14,16 | 0,705 |
| 20 | 1,205 | 1,005 | 0,0259 | 15,06 | 0,703 |
| 30 | 1,165 | 1,005 | 0,0267 | 16,00 | 0,701 |
| 40 | 1,128 | 1,005 | 0,0276 | 16,96 | 0,699 |
| 50 | 1,093 | 1,005 | 0,0283 | 17,95 | 0,698 |
| 60 | 1,060 | 1,005 | 0,0290 | 18,97 | 0,696 |
| 70 | 1,029 | 1,009 | 0,0296 | 20,02 | 0,694 |
| 80 | 1,000 | 1,009 | 0,0305 | 21,09 | 0,692 |
| 90 | 0,972 | 1,009 | 0,0313 | 22,10 | 0,690 |
| 100 | 0,946 | 1,009 | 0,0321 | 23,13 | 0,688 |
| 120 | 0,898 | 1,009 | 0,0334 | 25,45 | 0,686 |
| 140 | 0,854 | 0,013 | 0,0349 | 27,80 | 0,684 |
| 160 | 0,815 | 1,017 | 0,0364 | 30,09 | 0,682 |
| 180 | 0,779 | 1,022 | 0,0378 | 32,49 | 0,681 |
| 200 | 0,746 | 1,026 | 0,0393 | 34,85 | 0,680 |
| 250 | 0,674 | 1,038 | 0,0427 | 40,61 | 0,677 |
| 300 | 0,615 | 1,047 | 0,0460 | 48,33 | 0,674 |
| 350 | 0,566 | 1,059 | 0,0491 | 55,46 | 0,678 |
| 400 | 0,524 | 1,068 | 0,0521 | 63,09 | 0,678 |
| 500 | 0,456 | 1,093 | 0,0574 | 79,38 | 0,687 |
| 600 | 0,404 | 1,114 | 0,0622 | 96,89 | 0,699 |
| 700 | 0,362 | 1,135 | 0,0671 | 115,4 | 0,706 |
| 800 | 0,329 | 1,156 | 0,0718 | 134,8 | 0,713 |

| t , °C | ρ , кг/м ³ . | c_p , кДж/(кг·К) | λ Вт/(м·К) | $\nu \cdot 10^6$, м ² /с | Pr |
|-------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|-------|
| 900 | 0,301 | 1,172 | 0,0763 | 155,1 | 0,717 |
| 1000 | 0,277 | 1,185 | 0,0807 | 177,1 | 0,719 |
| 1100 | 0,257 | 1,197 | 0,0850 | 199,3 | 0,722 |
| 1200 | 0,239 | 1,210 | 0,0915 | • 233,7 | 0,724 |

Таблица П.2 – Физические свойства воды на линии насыщения

| t , °C | $P \cdot 10^{-5}$, Па | ρ , кг/м ³ | c_p , кДж/(кг·К) | λ , Вт/(м·К) | $\nu \cdot 10^6$, м ² /с | $\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹ | Pr |
|-------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|---|---|-------|
| 0 | 1,013 | 999,9 | 4,212 | 0,55 | 1,789 | -0,63 | 13,67 |
| 10 | 1,013 | 999,7 | 4,191 | 0,57 | 1,306 | 0,70 | 9,52 |
| 20 | 1,013 | 998,2 | 4,183 | 0,60 | 1,006 | 1,82 | 7,02 |
| 30 | 1,013 | 995,7 | 4,174 | 0,62 | 0,805 | 3,21 | 5,42 |
| 40 | 1,013 | 992,2 | 4,174 | 0,64 | 0,659 | 3,87 | 4,31 |
| 50 | 1,013 | 988,1 | 4,174 | 0,65 | 0,556 | 4,49 | 3,54 |
| 60 | 1,013 | 983,2 | 4,179 | 0,66 | 0,478 | 5,11 | 2,98 |
| 70 | 1,013 | 977,8 | 4,187 | 0,67 | 0,415 | 5,70 | 2,55 |
| 80 | 1,013 | 971,8 | 4,195 | 0,67 | 0,365 | 6,32 | 2,21 |
| 90 | 1,013 | 965,3 | 4,208 | 0,68 | 0,326 | 6,95 | 1,95 |
| 100 | 1,013 | 958,4 | 4,220 | 0,68 | 0,295 | 7,52 | 1,75 |
| 110 | 1,43 | 951,0 | 4,233 | 0,69 | 0,272 | 8,08 | 1,60 |
| 120 | 1,98 | 943,1 | 4,250 | 0,69 | 0,252 | 8,64 | 1,47 |
| 130 | 2,70 | 934,8 | 4,266 | 0,69 | 0,233 | 9,19 | 1,36 |
| 140 | 3,61 | 926,1 | 4,287 | 0,69 | 0,217 | 9,72 | 1,16 |
| 150 | 4,76 | 917,0 | 4,313 | 0,68 | 0,203 | 10,3 | 1,17 |
| 160 | 6,18 | 907,4 | 4,346 | 0,68 | 0,191 | 10,7 | 1,10 |
| 170 | 7,92 | 897,3 | 4,380 | 0,68 | 0,181 | 11,3 | 1,05 |
| 180 | 10,03 | 886,9 | 4,417 | 0,67 | 0,173 | 11,9 | 1,00 |
| 190 | 12,55 | 876,0 | 4,459 | 0,67 | 0,165 | 12,6 | 0,96 |
| 200 | 15,55 | 863,0 | 4,505 | 0,66 | 0,158 | 13,3 | 0,9 |
| 210 | 19,08 | 852,8 | 4,555 | 0,66 | 0,153 | 14,1 | 0,9 |
| 220 | 23,20 | 840,3 | 4,614 | 0,65 | 0,148 | 14,8 | 0,89 |
| 230 | 27,98 | 827,3 | 4,681 | 0,64 | 0,145 | 15,9 | 0,88 |
| 240 | 33,48 | 813,6 | 4,756 | 0,63 | 0,141 | 16,8 | 0,87 |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $P \cdot 10^{-5}, \text{Па}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ | $\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\beta \cdot 10^4, \text{К}^{-1}$ | P_T |
|---------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|-----------------------------------|-------|
| 250 | 39,78 | 799,0 | 4,844 | 0,62 | 0,137 | 18,1 | 0,86 |
| 260 | 46,94 | 784,0 | 4,949 | 0,61 | 0,135 | 19,7 | 0,87 |
| 270 | 55,05 | 767,9 | 5,070 | 0,59 | 0,133 | 21,6 | 0,88 |
| 280 | 64,19 | 750,7 | 5,230 | 0,57 | 0,131 | 23,7 | 0,90 |
| 290 | 74,45 | 732,3 | 5,485 | 0,56 | 0,129 | 26,2 | 0,93 |
| 300 | 85,92 | 712,5 | 5,736 | 0,54 | 0,128 | 29,2 | 0,97 |
| 320 | 112,90 | 667,1 | 6,574 | 0,51 | 0,128 | 38,2 | 1,П |
| 340 | 146,08 | 610,1 | 8,165 | 0,46 | 0,127 | 53,4 | 1,39 |
| 350 | 165,37 | 574,4 | 9,504 | 0,43 | 0,126 | 66,8 | 1,60 |
| 360 | 186,74 | 528,0 | 13,984 | 0,40 | 0,126 | 109 | 2,3 |
| 370 | 210,53 | 450,5 | 40,321 | 0,34 | 0,126 | 264 | 6,79 |

Таблица П.3 – Физические свойства некоторых металлов

| Наименование материала | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ | $c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ |
|------------------------|-----------------------|---------------------|---|---------------------------------------|
| Алюминий | 2700 | 0 | 209 | 0,896 |
| Бронза | 8800 | 20÷200 | 48,2 | 0,368 |
| Латунь | 8500 | 20÷200 | 109 | 0,392 |
| Медь | 8930 | 0 | 390 | 0,388 |
| Нержав, сталь 1Х18Н10Т | 7860 | 20÷200 | 16,3 | 0,494 |
| Серебро | 10500 | 0 | 419 | 0,234 |
| Сталь 20 | 7830 | 20÷200 | 51,0 | 0,494 |
| Сталь 45 | 7830 | 20÷200 | 47,8 | 0,490 |
| Титан | 4540 | 0 | 15,1 | 0,531 |

Таблица П.4 – Степень черноты различных металлов

| Наименование материала | t, °C | ε |
|-------------------------------------|----------|-----------|
| Алюминиевая краска | - | 0,50 |
| Алюминий полированный | 50÷500 | 0,04÷0,06 |
| Алюминий с шероховатой поверхностью | 20÷50 | 0,06÷0,07 |
| Асбестовый картон | 20 | 0,96 |
| Жесть белая старая | 20 | 0,28 |
| Железо оцинкованное | 30 | 0,23 |
| Кирпич красный шероховатый | 20 | 0,88÷0,93 |
| Лак черный матовый | 40÷100 | 0,96÷0,98 |
| Лак белый | 40÷100 | 0,80÷0,95 |
| Латунь полированная | 200 | 0,03 |
| Латунь листовая прокатная | 20 | 0,06 |
| Масляная краска | - | 0,94 |
| Медь окисленная | 500 | 0,88 |
| Медь полированная | 50÷1000 | 0,02 |
| Снег | - | 0,96 |
| Сталь окисленная | - | 0,80 |
| Сталь полированная | - | 0,54 |
| Сталь с шероховатой поверхностью | 50 | 0,56 |
| Стекло | 250÷1000 | 0,87÷0,72 |
| Хром полированный | - | 0,17 |
| Чугун шероховатый | - | 0,96 |
| Эмаль белая | 20 | 0,90 |