

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 17.05.2024 11:40:41

Уникальный программный ключ:

9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра теплогазоводоснабжения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Лукионова

«20» 11



## ТЕПЛОМАССОБМЕН

Методические указания к практическим занятиям и  
самостоятельной работе для студентов направлений подготовки  
08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и  
теплотехника» очной, очно-заочной и заочной форм обучения

Курск 2023 г.

УДК 536.2, 546.3

Составитель: В.А. Жмакин

Рецензент

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

**Тепломассообмен:** методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов направлений подготовки 08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» очной, очно-заочной и заочной форм обучения / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.А. Жмакин. – Курск, 2023. – 33 с.: ил. 9, табл. 8, прилож. 4. – Библиогр.: с. 29.

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

Методические указания предназначены для студентов направлений подготовки 08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» очной, очно-заочной и заочной форм 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. 1,92. Уч. изд.л. 1,74. Тираж 100 экз. Заказ 1245  
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	14
Задача №5. Расчет теплообменного аппарата	18
Задача №6. Процессы массообмена	23
Контрольные вопросы	25
Библиографический список	29
Приложения	30

### 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 кирпича толщиной  $\delta_1$ , [ $\lambda_1=1,14$  Вт/(м·К)] и красного кирпича толщиной  $\delta_3$ , [ $\lambda_3=0,76$  Вт/(м·К)], между которыми расположена засыпка из изоляционного материала толщиной  $\delta_2=125$  мм.

Определить тепловые потери через  $1 \text{ м}^2$  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  $\delta_3^*$ , 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	$\delta_1$ , мм	$t_{w1}$ °C	Вариант III	$\delta_3$ , мм	$t_{w2}$ , °C	Изоляционный материал	
						Название	$\lambda_2=f(t)\dots$ ,Вт/(м·К)
0	80	1050	0	60	90	Совелит	$\lambda_2=0,0901+0,000087\times t$
1	90	980	1	60	85	Новоасбозурит	$\lambda_2=0,144+0,00014\times t$
2	80	1070	2	120	93	Диатомит молот.	$\lambda_2=0,091+0,00028\times t$
3	100	950	3	60	97	Вермикулит	$\lambda_2=0,072+0,000362\times t$
4	120	1030	4	125	86	Асбослюда	$\lambda_2=0,120+0,000148\times t$
5	120	945	5	125	82	Асботермит	$\lambda_2=0,109+0,000145\times t$
6	80	1020	6	125	94	Асбозонолит	$\lambda_2=0,143+0,00019\times t$
7	90	990	7	60	78	Асбозурит	$\lambda_2=0,1622+0,000169\times t$
8	80	1140	8	120	89	Диатомит молот	$\lambda_2=0,091+0,00028\times t$
9	120	1135	9	60	91	Шлаковая вата	$\lambda_2=0,05+0,000145\times t$

Примечания:

1)  $t = (t_{w1} + t_{w2})/2$ ;

2) Расчетное значение толщины красного кирпича округлить (в сторону увеличения) до величины, кратной 120 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?

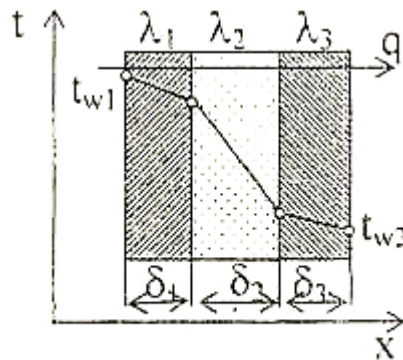


Рис.1. Расчетная схема 3-х слойной плоской стенки

Решение:

1) Находим тепловой поток  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, 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;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  - 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  $\lambda_2$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , 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).

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

Подставляем полученное значение  $\lambda_2$  в формулу (1) теплового потока и получаем:

$$q = (980 - 78) / (0,4/1,14 + 0,125/0,25 + 0,12/0,76) = 894 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

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  $\delta_3$ .

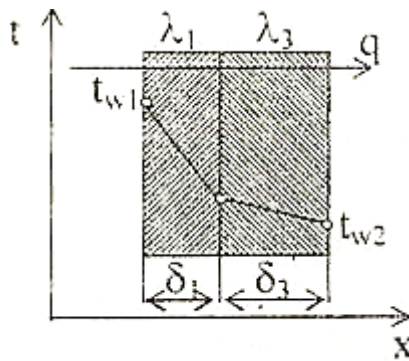


Рис. 2. Расчетная схема 2-х слойной плоской стенки

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 120 и получаем  $\delta_3^* = 600 \text{ мм.}$

Ответ: тепловой поток  $q = 894 \text{ Вт/м}^2$ ; толщина красного кирпича при отказе от слоя засыпки увеличится до  $\delta_3^* = 600 \text{ мм}$  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,  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , 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	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	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
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:  $t_{w1}=200\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t_{w2}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; степени черноты поверхностей:  $\varepsilon_1=0,65$ ,  $\varepsilon_2=0,7$ ; материал экрана - латунь листовая прокатная.

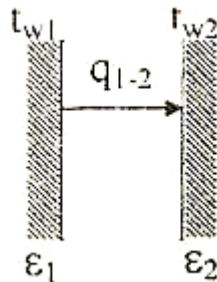


Рис.3. Лучистый теплообмен между поверхностями без экрана

Решение:

1) Между поверхностями НЕТ экрана, рис. 3.

Определяем удельный тепловой поток  $q_{1-2}$ , Вт/м<sup>2</sup>, между плоскими поверхностями по формуле:

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

где  $C_0=5,67\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  - приведенная степень черноты поверхностей, участвующих в теплообмене.

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

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

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{0,65} + \frac{1}{0,7} - 1} = 0,51.$$



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

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

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

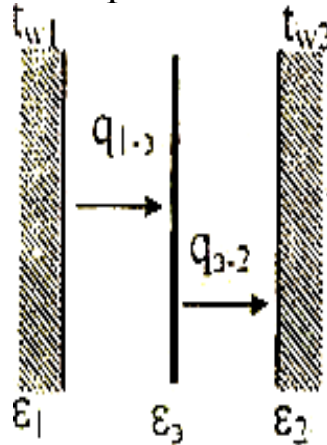


Рис.4. Лучистый теплообмен между поверхностями с одним экраном

При установившихся условиях:

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

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

Тепловой поток при наличии экрана  $q_{1-2}^{\text{э}}$ , Вт/м<sup>2</sup>:

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

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

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

$$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right) - (n+1)} \quad (8)$$

В данной задаче один экран, т.е.  $n=1$ . Степень черноты экрана выбираем по табл. П 4, следовательно, для латуни листовой прокатной  $\varepsilon^3=0,06$ .

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

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

Тепловой поток при наличии экрана

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

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  $\ell$  м, охлаждаемого свободным потоком воздуха, если температура поверхности трубопровода,  $t_w$  температура воздуха в помещении,  $t_f$  (степень черноты трубы  $\varepsilon$  см. табл. П.4). Данные, необходимые для решения задачи, взять из табл.3.

Таблица 3 – Исходные данные к расчету

Вариант П	$d$ , мм	$\ell$ , 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

Вариант П	d, мм	ℓ, м	Вариант ПП	t <sub>w</sub> , °С	t <sub>f</sub> , °С	Поверхность трубы
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  $t_f=20$  °С, расположена труба наружным диаметром  $d=320$  мм и длиной  $\ell=10$  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 общие тепловые потери трубой за сутки и отдельно конвекцией и излучением (см.рис 5).

Решение:

Общие тепловые потери  $Q_o$ , Вт, трубы составляют:

$$Q_o = Q_k + Q_{\text{л}}, \quad (9)$$

где  $Q_k$  - тепловые потери за счет конвекции;  $Q_{\text{л}}$  - тепловые потери за счет излучения.

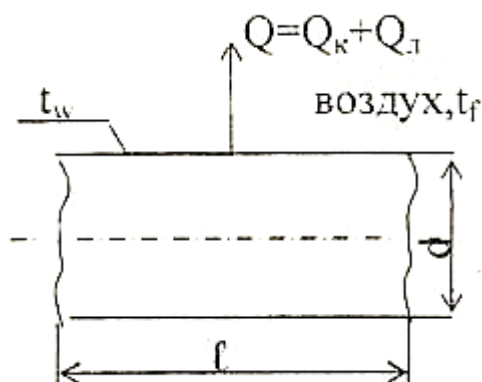


Рис. 5. Расчетная схема для определения сложной теплоотдачи конвекцией и излучением

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  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи при свободном движении воздуха, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$$F = \pi \cdot d \cdot \ell - \text{поверхность трубы, м}^2; \quad (11)$$

$$F = \pi \cdot d \cdot \ell = 3,14 \cdot 0,32 \cdot 10 = 10,048 \text{ м}^2.$$

Коэффициент теплоотдачи для горизонтальной трубы определяется по критериальному уравнению:

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

$$\text{где } Nu_f = \alpha \cdot d / \lambda_f - \text{критерий Нуссельта.} \quad (13)$$

$Pr_f$  – критерий Прандтля при температуре теплоносителя  $t_f$ ;

$Pr_w$  – критерий Прандтля при температуре стенки трубы  $t_w$ ;

$Gr_f$  – критерий Грасгофа при температуре теплоносителя  $t_f$ ;

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

Для определения критериев Прандтля, Грасгофа и Нуссельта необходимо задать определяющую температуру, равной температуре окружающей среды  $t_f$ ; и определяющий размер, равный наружному диаметру трубы  $d$ .

1) Выбираем свойства воздуха при температуре  $t_f = 20$  °С по таблице теплофизических свойств воздуха (табл. П. 1):

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

$\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с - коэффициент кинематической вязкости воздуха;

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

2) Критерий Грасгофа определяем по формуле:

$$Gr = g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot (t_w - t_f) / \nu^2, \quad (14)$$

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

$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение силы тяжести.

Считаем критерий Грасгофа:

$$Gr = 9,81 \cdot 0,32^3 \cdot 0,0034 \cdot (140 - 20) / (15,06 \cdot 10^{-6})^2 = 5,81 \cdot 10^8.$$

4) Решаем критериальное уравнение (12):

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

5) Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·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:

$$Q_K = \alpha (t_w - t_f) F = 5,75(140 - 20) \cdot 10,048 = 6933 \text{ Вт}$$

Это потери тепла в секунду (Вт=Дж/с).

За сутки потери тепла составят:

$$Q_K^{\text{сут}} = Q_K \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 6933 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 599000 \text{ кДж.}$$

(Множитель  $10^{-3}$  означает перевод размерности Дж в кДж.)

**Б) Тепловые потери за счет излучения определяем по формуле:**

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_o \left[ \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \text{ Вт}, \quad (15)$$

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

При условии, что поверхность трубы много меньше поверхности стен в цехе, получаем:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_w. \quad (16)$$

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

Подставляем исходные данные в формулу (15):

$$Q_{\text{л}} = 0,96 \cdot 5,67 \left[ \left( \frac{140 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 10,048 = 11881 \text{ Вт}$$

За сутки потери тепла составят:

$$Q_{\text{л}}^{\text{сут}} = Q_{\text{л}} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 11881 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 1027000 \text{ кДж.}$$

Определяем общие теплотери за сутки:

$$Q_o^{\text{сут}} = Q_K^{\text{сут}} + Q_{\text{л}}^{\text{сут}} = 599000 + 1027000 = 1626000 \text{ кДж.}$$

**Ответ:** потери тепла горячей трубой за сутки составляют: общие 1626000 кДж, 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  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , 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  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  принять температуру поверхностей трубы  $t_w$ , равной  $t_w=(t_1+t_2)/2$ .

Таблица 4 – Исходные данные к расчету

Вариант П	$t_1$ °С	$W$ , м/с	Вариант ПП	$t_2$ , °С	$d_1$ , 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  $\alpha_1$  от воды к внутренней стенке трубы;

Б) коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  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.

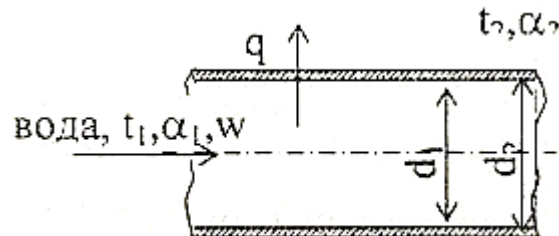


Рис. 6. Расчетная схема теплопередачи через цилиндрическую стенку

Решение:

**А) Определение коэффициента теплоотдачи от воды к внутренней стенке трубы  $\alpha_1$ .**

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;

$\nu_1 = 0,158 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/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:

$$Re_1 = w \cdot d_1 / \nu_1 \quad (17)$$

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

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:

$$Nu_1 = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot (Pr_1/Pr_w)^{0,25}. \quad (18)$$

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

$$Nu_1 = 0,15 \cdot Re_1^{0,33} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot (Pr_1/Pr_w)^{0,25}. \quad (19)$$

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

$$Nu_1 = 0,008 Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot (Pr_1/Pr_w)^{0,25}. \quad (20)$$

В данной задаче режим движения воды в трубе турбулентный, т.к. полученное значение  $Re > 10000$ , поэтому используем формулу (18).

4) Подставляем исходные и полученные данные в критериальное уравнение (18) 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 $\alpha_2$ .**

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

Критериальное уравнение для горизонтальной трубы при свободном движении воздуха:

$$Nu_2 = 0,5 (Pr \cdot Gr)^{0,25} \quad (21)$$

6) Свойства воздуха при температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  (выбираем по таблице физических свойств воздуха, табл. П.1)

$\lambda_2 = 0,0259 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  - коэффициент теплопроводности воздуха;

$\nu_2 = 1,506 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  - коэффициент кинематической вязкости воздуха;

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

7) Критерий Грасгофа определяем по формуле:



$$Gr_2 = g \cdot d_2^3 \cdot \beta \cdot (t_w - t_2) / \nu_2^2 \quad (22)$$

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

8) Решаем критериального уравнения по формуле (21):

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

9) Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = Nu_2 \cdot \lambda_2 / d_2 \quad (23)$$

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

### 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:

$$K_\ell = \frac{1}{\frac{1}{(\alpha_1 \cdot d_1)} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{(\alpha_2 \cdot d_2)}}, \quad (24)$$

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

$$K_\ell = \frac{1}{\frac{1}{(2200 \cdot 0,18)} + \frac{1}{2 \cdot 51} \cdot \ln\left(\frac{0,2}{0,18}\right) + \frac{1}{(6,0 \cdot 0,2)}} = 1,20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

11) Линейный тепловой поток  $q_l$ , Вт/м:

$$q_l = \pi \cdot K_\ell \cdot (t_1 - t_2) \quad (25)$$

Подставляем известные данные в это уравнение и получаем

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

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  $K_\ell = 1,20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;
- 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  $\alpha_1$  и от труб к воде  $\alpha_2$ .

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  $\lambda_{\text{н}}=0,15$  Вт/(м·К), накипи -  $\lambda_{\text{н}} =1,75$  Вт/(м·К). Теплопроводность материала труб приведена в табл. 5.

Кривизной стенки трубы можно пренебречь (расчеты выполнить по формулам для плоской стенки). 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	$t_1'$ °C	$t_1''$ °C	$t_2'$ °C	$t_2''$ °C	Вариант ПП	$G_2$ , т/ч	$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·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 сталь	270	200	65	140	6	5,0	35	3500
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  $38 \times 3$  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/(м<sup>2</sup>·К) и от труб к воде -  $\alpha_2 = 4100$  Вт/(м<sup>2</sup>·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.

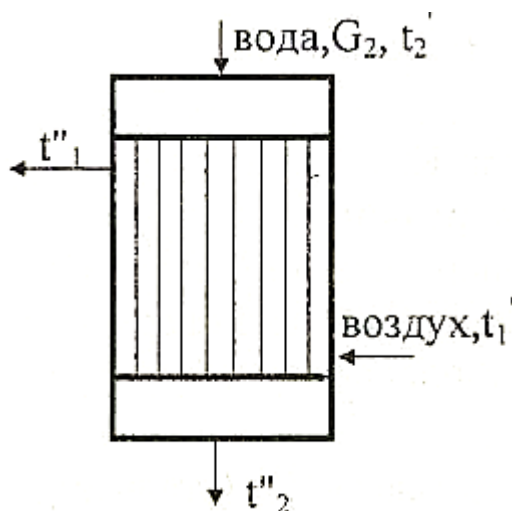


Рис. 7. Расчетная схема теплообменного аппарата

Искомая поверхность теплопередачи определяется по формуле:

$$F=Q/(K \cdot \Delta t_{cp}), \quad (26)$$

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

$K$  - коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Delta t_{cp}$  - средняя разность температур между воздухом и водой, °С.

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

$$Q=Q_1= Q_2 + Q_{пот}, \quad (27)$$

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:

$$Q=1,05Q_2= 1,05 \cdot G_2 c_2 \cdot (t_2''-t_2'), \quad (28)$$

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 полученные величины в уравнение теплового баланса (28) 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/(м<sup>2</sup>·К):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (29)$$

где  $\delta$  и  $\lambda$  - толщина стенки трубы (м) и коэффициент теплопроводности материала трубы (Вт/(м·К), соответственно.

По условию задачи размер трубы 38×3, 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,

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

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

Прямоточная схема движения представлена на рис.8.

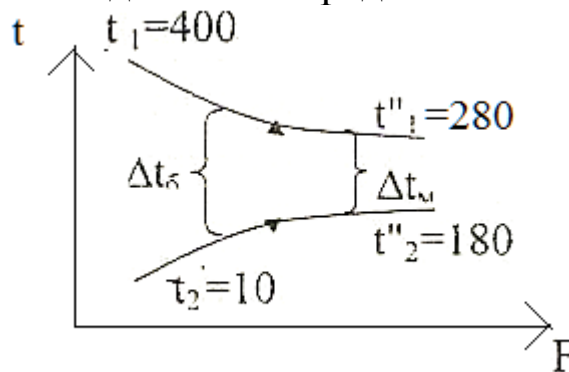


Рис.8. Прямоточная схема движения теплоносителей.

Находим большую ( $\Delta t_b$ ) и меньшую ( $\Delta t_m$ ) разности температур между воздухом и водой на одном конце аппарата и на другом.

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

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

$$\Delta t_b / \Delta t_m = (390/100) > 2, \text{ следовательно,}$$

средний температурный напор определяем как среднелогарифмический по формуле:

$$\Delta t_{\text{ср(прям)}} = \frac{\Delta t_b - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_b}{\Delta t_m}\right)} \quad (30)$$

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

4) Поверхность теплопередачи при прямотоке равна,  $\text{м}^2$ :

$$F_{\text{прям}} = Q / K \cdot \Delta t_{\text{ср(прям)}} \quad (31)$$

$$F_{\text{прям}} = 730800 / (48,36 \cdot 213) = 70,86 \text{ м}^2.$$

4) Определяем средний температурный напор для противоточной схемы движения воздуха и воды и поверхность теплопередачи.

Противоточная схема движения представлена на рис.9.

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

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

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

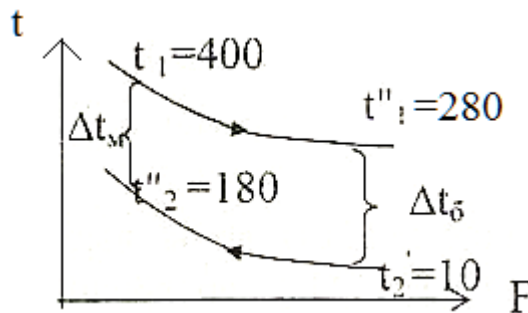


Рис.9. Противоточная схема движения теплоносителей.

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

$$\Delta t_{\text{ср(против)}} = 0,5(\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}) \quad (32)$$

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

5) Поверхность теплопередачи при противотоке равна,  $\text{м}^2$ :

$$F_{\text{против}} = Q / (K \cdot \Delta t_{\text{ср(против)}}) \quad (33)$$

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

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

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

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

### Задача №6. Процессы массообмена

Вычислить коэффициент массоотдачи в процессе сушки песка в воздушной конвективной сушилке. Сушильный агент - воздух с параметрами по психрометру: температура сухого термометра  $t_c$ , °С и температура мокрого термометра  $t_m$ , °С, 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	Показание психрометра		P, мм рт.ст.	Вариант ПП	W, м/с	ε, м
	$t_c$ , °С	$t_m$ , °С				
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  $D_0=21,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/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  $\beta$  определяем по критериальному уравнению для сушки материалов:

$$Nu_D = C \cdot Re^n \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Gu^{0,135}, \quad (34)$$

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  $\nu = 16 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/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:

$$D = D_0 \cdot (P_0/P) \cdot [(273+t_c)/273]^{1+n}, \quad (35)$$

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:

$$Pr_0 = \nu/D = 16 \cdot 10^{-6} / 0,26 \cdot 10^{-4} = 0,615. \quad (36)$$

5) Критерий Гухмана:

$$Gu = (T_c - T_m) / T_c = [(273+32) - (273+18)] / (273+32) = 0,0459. \quad (37)$$

6) Критерий Нуссельта определяем по формуле (34):

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

7) Коэффициент массоотдачи:

$$\beta = Nu_D \cdot D / l = 271 \cdot 0,26 \cdot 10^{-4} / 0,6 = 0,0117 \text{ м/с}. \quad (38)$$

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

### 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

## Контрольные 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. Мирам, Андрей Олегович. Техническая термодинамика. Тепломассообмен : учебник для студентов, обучающихся по направлению 270100 "Строительство" / А. О. Мирам, В. А. Павленко. - Москва : АСВ, 2017. - 352 с.
2. Теплотехника [Текст] : учебник / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : БАСТЕТ, 2010. - 328 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. - 2-е изд., испр. - М. : Академия, 2008. - 272 с.
5. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст] : учебное пособие / под ред. А.А. Захаровой. - М.: Академия, 2006. - 272 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  
 $P=1,013 \cdot 10^5$  Па

t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /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	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /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	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	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

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$P \cdot 10^{-5}, \text{ Па}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c_p, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{ К}^{-1}$	$P_T$
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	1,11
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	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$c_p, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$
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	$\epsilon$
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