

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Кафедра химических технологий

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ**

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА, ч.2

для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению
**18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии»**

Владимир – 2016 г.

Данные методические указания включают рекомендации по содержанию и выполнению практических занятий по дисциплине «Техническая термодинамика и теплотехника для студентов направления» 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» ВлГУ.

Методические указания составлены на основе требований ФГОС ВО и ОПОП направления 18.03.02. «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», рабочей программы дисциплины «Техническая термодинамика и теплотехника»:

Рассмотрены и одобрены на
заседании УМК направления
18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие
процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии»
Протокол № 1 от 5.09.2016 г.

Рукописный фонд кафедры ХТ ВлГУ

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
Глава 1. СТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ	4
1.1. Общие понятия о теплотехнике	4
1.2. Теплопроводность плоской стенки в стационарном режиме.	5
1.3. Варианты решения задач теплопроводности через плоскую стенку	6
1.4. Теплопроводность многослойной плоской стенки	14
1.5. Варианты решения задач теплопроводности через многослойную плоскую стенку	15
1.6. Теплопроводность через цилиндрическую стенку.	18
1.7. Задания и варианты решения задачи теплопроводности через многослойную цилиндрическую стенку	21
1.8. Вопросы для самопроверки	23
Глава 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ	24
2.1. Конвективный теплообмен	24
2.2. Теплопередача через плоскую стенку в граничных условиях третьего рода.	27
2.3. Задания и варианты решения задачи теплопередачи через многослойную плоскую стенку	28
2.4. Теплопередача через цилиндрическую и шаровую стенки в граничных условиях третьего рода.	31
2.5. Вопросы и задачи для самоподготовки	32
2.6. Варианты решения задачи теплопередачи через цилиндрическую стенку	34
2.7. Лучистый теплообмен	38
2.8. Вопросы для самоподготовки и варианты решения задач	49
2.9. Вопросы к рейтингу	69
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	71

ВВЕДЕНИЕ

Курс технической термодинамики и теплотехники изучается студентами разнообразных специальностей. Выпуск настоящего учебного пособия обусловлен спецификой подготовки бакалавров по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»

При подготовке первой части пособия была поставлена цель краткого изложения теоретического курса основ термодинамики, которые позволят студентам подготовиться к решению конкретных производственных задач, связанных со специализацией их последующего обучения и работы.

Практическое пособие представлено шестью главами, в которых изложены: краткий теоретический курс без выводов фундаментальных уравнений термодинамики, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения и самоподготовки, контрольные вопросы самоподготовки и многовариантные контрольные задачи. Фундаментальные знания по курсу студенты имеют возможность получить из книг и учебников, представленных в библиографическом списке. В пособии приведены в полной мере материалы и справочные данные, необходимые студентам для решения задач и выполнения контрольных мероприятий, что особенно важно для дистанционной формы обучения.

Приведенные примеры и задачи позволят дать знания студентам при решении вопросов проектирования тепловых агрегатов в химической технологии тугоплавких неметаллических, силикатных и полимерных материалов. Учебное пособие ориентировано на студентов старших курсов, изучающих курс "Техническая термодинамика и теплотехника", выполняющих курсовые работы по курсам «Оборудования и основы проектирования», «Основы проектирования тепловых агрегатов, выпускные квалификационные работы бакалавров

Глава 1. СТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

1.1. Общие понятия о теплотехнике

Теплотехника - наука изучающая методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принцип действия и конструктивные особенности тепло-, парогенераторов и тепловых машин, аппаратов, устройств. Различают два принципиально различных направления использования теплоты: энергетическое и технологическое. При **энергетическом** использовании теплота преобразуется в механическую энергию, при **технологическом** теплота направлена на изменение агрегатного состояния вещества, физико-механических и химических свойств. Теоретическими разделами теплотехники, изучающими закономерности превращения тепловой энергии и процессы распространения теплоты являются техническая термодинамика и теория теплообмена.

Теория теплообмена представляет собой науку, которая изучает законы распространения и передачи тепла между телами. Различают три вида теплообмена:

- 1) **теплопроводность (кондукция)** - перенос теплоты осуществляется при непосредственном соприкосновении частиц тела;
- 2) в подвижных системах (газ, жидкость) передача теплоты может осуществляться при перемешивании между собой частиц разной степени нагретости, т.е. **конвекцией**
- 3) **лучеиспусканием** - тепловым излучением за счет электромагнитных волн. На поверхности поглощающего тепло тела излучение превращается в тепловую энергию

В целом явление передачи теплоты методом конвекции от подвижных систем (газа, жидкости) при соприкосновении со стенкой путем теплопроводности и обратный процесс носят название конвективного **теплообмена или теплоотдачи**.

В топочных устройствах все эти процессы протекают одновременно.

Процесс распространения теплоты в пространстве непрерывно связан с распределением температур в нем. Совокупность значений температуры в каждый момент времени для всех точек рассматриваемого пространства называется **температурным полем**, которое математически выражается уравнением $t = f(x, y, z, \tau)$ x, y, z - координаты точки, τ - время. Если температура во времени не изменяется, то поле называется установив-

шимся, или **стационарным**. Если температура во времени изменяется, то поле называется неустановившимся, или **нестационарным**. Температурное поле может быть функцией одной, двух, трех координат и соответственно оно называется одно-, двух-, трехмерным. Одномерное стационарное поле имеет уравнение $t=f(x)$.

Все точки пространства, имеющие одинаковую температуру, образуют изотермическую поверхность. Изменение температуры в телах наиболее интенсивно происходит в направлении перпендикулярном изотермическим поверхностям. Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn при условии, что $\Delta n \rightarrow 0$, называется **температурным градиентом**

$$\lim \left[\frac{\Delta t}{\Delta n} \right]_{\Delta n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t$$

Количество теплоты, переносимой в единицу времени называется **тепловым потоком** Q Дж/с (Вт). Q , отнесенное к единице поверхности, называется плотностью теплового потока $q=Q/S$ (Вт/м²). Исследуя явление теплопроводности Фурье установил $Q = -\lambda S \frac{\partial t}{\partial n}$ или $q = -\lambda \text{grad } t$ [1.1]; где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), определяет мощность теплового потока, проходящего через 1 м² при градиенте температуры 1 К/м. Теплопроводность для теплоизоляционных материалов < 0,175 Вт/(м·К). С ростом пористости и уменьшением размера пор теплопроводность снижается. Наличие открытых пор в гидрофильных материалах приводит к их, что вызывает, в свою очередь, повышение теплопроводности.

1.2. Теплопроводность плоской стенки в стационарном режиме.

При рассмотрении уравнения [1.1] для бесконечно тонкого слоя dx , взятого на расстоянии x от поверхности, будем иметь $q = -\lambda (dt/dx)$ или $dt = -(q dx)/\lambda$ и $t = -(qx)/\lambda + C$. Постоянная интегрирования C определяется из граничных условий: при $x=0$ $t=t_1$, $C=t_1$, при $x=\delta$ $t=t_2 = [-(q\delta)/\lambda] + t_1$; откуда плотность теплового потока $q = [\lambda(t_1 - t_2)]/\delta$. [1.2] В стационарном режиме на поверхностях стенки постоянно поддерживаются температуры t_1 и t_2 . Температурное поле одномерно и меняется в направлении x . Теплопроводность стенки λ - постоянна. Источники теплоты внутри стенки отсутствуют.

Разность температур $(t_1 - t_2) = \Delta t$ называется температурным напором.

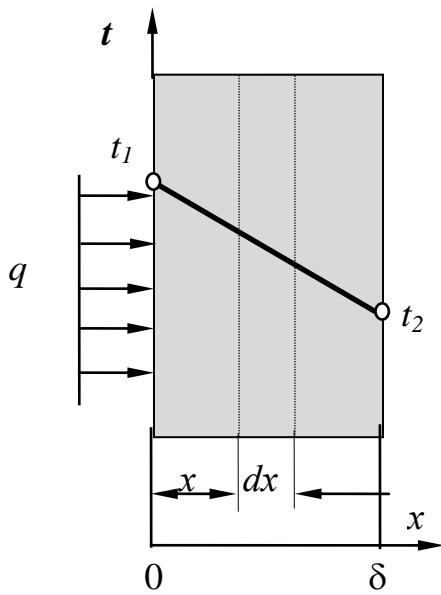


Рис.1.1 Схема теплопроводности через плоскую стенку

Отношение λ/δ , Вт/м²·К называют тепловой проводимостью стенки, показывающей, какое количество теплоты проводит 1 м² стенки за единицу времени при температурном напоре, равном одному градусу.

Обратная величина $R = (\delta/\lambda)$, К·м²/Вт называется термическим сопротивлением. Если в уравнение $t = -(qx)/\lambda + C$ подставить $C = t_1$ и $q = (\lambda \Delta t)/\delta$. то получим уравнение температурной кривой $t_x = t_1 - (\Delta t \cdot x)/\delta$ [1.3]. Это уравнение показывает, что при постоянном значении λ внутри однородной плоской стенки температура изменяется по закону

прямой линии. Общее количество теплоты, переданное через стенку в стационарном режиме

$$Q = qS\tau = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t S \tau \quad [1.4]$$

1.3. Варианты решения задач теплопроводности через плоскую стенку

Задание 1.1: Вычислить плотность теплового потока через плоскую однородную стенку, толщина которой равна δ мм и значительно меньше ширины и высоты, если стенка выполнена: а) из стали ($\lambda = 40$ Вт/(м·°С); б) из бетона ($\lambda = 1,12$ Вт/(м·°С); в) из диатомитового кирпича ($\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С) при температурах стенки t_{c1} и t_{c2} , представленных в табл. 1.1

Таблица.1.1

Варианты задания 1.1

Вариант	Задача 1. сталь, $\lambda = 40$ Вт/(м·°С)			Задача 2. бетон, $\lambda = 1,12$ Вт/(м·°С)			Задача 3. диатомитовый кирпич, ($\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С)		
	δ мм	t_{c1} °С	t_{c2} °С	δ мм	t_{c1} °С	t_{c2} °С	δ мм	t_{c1} °С	t_{c2} °С
1	0,8	20	100	200	25	60	250	100	300

Продолжение табл.1.1

Вариант	Задача 1. сталь, $\lambda=40$ Вт/(м·°С)			Задача 2. бетон, $\lambda= 1,12$ Вт/(м·°С)			Задача 3. диатомитовый кирпич, ($\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С)		
	δ мм	t_{c1} °С	t_{c2} °С	δ мм	t_{c1} °С	t_{c2} °С	δ мм	t_{c1} °С	t_{c2} °С
2	1,0	20	120	220	25	50	250	120	400
3	1,2	20	140	240	25	40	250	140	500
4	1,4	25	160	100	20	160	250	160	300
5	1,6	25	180	120	20	180	250	180	400
6	1,8	25	100	130	25	100	250	100	500
7	2,0	25	120	140	25	120	375	120	300
8	2,1	20	140	160	25	140	375	140	400
9	2,2	20	160	180	25	160	375	160	500
10	2,3	20	180	200	20	180	375	180	300
11	2,4	25	100	180	20	100	375	100	400
12	2,5	25	120	160	20	120	250	120	500
13	2,6	25	140	140	25	140	250	140	300
14	2,7	25	160	180	25	160	250	160	400
15	2,8	20	180	180	25	180	250	180	500
16	2,9	20	100	260	25	-20	250	100	300
17	3,0	20	120	200	25	-25	250	120	400
18	2,0	25	140	220	25	-30	375	140	500
19	2,1	25	160	240	20	60	375	160	300
20	2,2	25	180	260	20	50	375	180	400
21	2,3	25	100	200	20	40	375	100	500
22	2,4	20	120	220	25	35	375	120	300
23	2,5	20	140	240	25	30	250	140	400
24	2,6	20	160	260	25	25	250	160	500
25	2,7	25	180	200	25	-20	250	180	300
26	2,8	25	100	220	20	-25	250	100	400
27	2,9	25	120	240	25	-30	250	120	500
28	3,0	25	140	260	25	60	250	140	300
29	0,8	20	160	200	25	50	375	160	400
30	1,0	20	180	220	25	40	375	12	500
32	1,2	20	100	240	20	35	375	140	300
33	1,4	25	120	260	20	30	375	40	400
34	1,6	25	140	200	20	25	375	60	500
35	2,0	25	140	260	25	-25	250	160	300
36	2,1	25	160	200	25	-30	250	180	400
37	2,2	25	180	220	25	60	250	100	500
38	2,3	25	100	240	25	50	375	120	300

Окончание табл.1.1

Вариант	Задача 1. сталь, $\lambda=40$ Вт/(м·°С)			Задача 2. бетон, $\lambda= 1,12$ Вт/(м·°С)			Задача 3. диатомитовый кирпич, ($\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С)		
	δ мм	t_{c1} °С	t_{c2} °С	δ мм	t_{c1} °С	t_{c2} °С	δ мм	t_{c1} °С	t_{c2} °С
39	2,4	20	120	260	20	40	375	140	400
40	2,5	20	140	200	20	35	375	160	500
41	2,6	20	160	220	20	30	375	180	300
42	3,0	25	140	220	25	-30	250	160	400
43	0,8	20	160	240	20	60	250	180	500
44	1,0	20	180	260	20	50	250	100	300
45	1,2	20	100	200	20	40	250	120	400
46	1,4	25	120	220	25	35	375	140	500
47	1,6	25	140	240	25	30	375	160	300
48	0,8	20	100	260	25	25	375	180	400
49	1,0	20	120	200	25	-20	375	100	500
50	1,2	20	140	220	20	-25	375	120	300
51	2,2	20	160	240	25	-30	250	120	500
52	2,3	20	180	260	25	60	250	140	300
53	2,4	25	100	200	25	50	250	160	400
54	2,5	25	120	220	25	40	250	180	500
55	2,6	25	140	240	20	35	250	100	300
56	2,7	25	160	260	20	30	250	120	400
57	2,8	20	180	200	20	25	375	140	500
58	2,9	20	100	100	20	160	375	160	300
59	3,0	20	120	120	20	180	375	180	400
60	2,0	25	140	130	25	100	375	100	500

Задание 1.2 Рассчитать температуру стенки t_{c1} °С из материалов, представленных в табл. 1.2 при условиях: плотность теплового потока равна q , Вт/м²; толщина стенки равна δ мм и температура стеки со стороны теплоносителя равна t_{c2} °С

Таблица 1.2

Варианты задания 1.2

Вариант	Задача 1. Сталь, $\lambda=40$ Вт/(м·°С)			Задача 2. Бетон, $\lambda= 1,12$ Вт/(м·°С)			Задача 3. Диатомитовый кирпич, ($\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С)		
	δ мм	q , Вт/м ²	t_{c2} °С	δ мм	q , Вт/м ²	t_{c2} °С	δ мм	q , Вт/м ²	t_{c2} °С
1	1,4	2000	100	220	260	60	375	80	300

Продолжение табл.1.2

Вариант	Задача 1. Сталь, $\lambda=40$ Вт/(м·°С)			Задача 2. Бетон, $\lambda= 1,12$ Вт/(м·°С)			Задача 3. Диатомитовый кирпич, ($\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С))		
	δ мм	q , Вт/м ²	t_{c2} °С	δ мм	q , Вт/м ²	t_{c2} °С	δ мм	q , Вт/м ²	t_{c2} °С
2	1,6	3000	120	240	280	50	375	90	400
3	1,8	4000	140	260	160	40	375	100	500
4	2,0	1000	160	200	180	35	375	120	300
5	2,1	4000	180	200	200	30	250	60	400
6	2,2	3000	100	220	160	25	250	80	500
7	2,3	2000	120	240	180	-20	250	90	300
8	2,4	1000	140	260	200	-25	250	100	400
9	2,5	4000	160	200	220	-30	250	120	500
10	2,6	3000	180	220	160	60	375	60	300
11	2,7	2000	100	240	180	50	375	80	400
12	2,8	1000	120	260	200	40	375	90	500
13	2,9	4000	140	200	220	35	375	100	300
14	3,0	3000	160	220	240	30	375	120	400
15	2,0	2000	180	240	260	25	250	60	500
16	2,1	1000	100	260	280	-20	250	80	300
17	2,2	4000	120	200	160	-25	250	60	400
18	2,3	3000	140	220	160	-30	250	80	500
19	2,4	2000	160	240	180	60	250	90	300
20	2,5	1000	180	260	200	50	250	100	400
21	2,6	4000	100	200	220	40	375	120	500
22	2,7	3000	120	220	240	35	375	60	300
23	1,4	2000	140	220	240	30	250	80	400
24	1,6	1000	160	240	260	25	250	90	500
25	1,8	4000	180	260	280	-20	250	100	300
26	2,0	3000	100	200	160	-25	250	120	400
27	2,1	2000	120	220	180	-30	250	60	500
28	2,2	1000	140	240	200	60	375	80	300
29	2,3	4000	160	260	220	50	375	90	400
30	2,4	3000	180	200	240	40	375	90	500
32	2,5	2000	100	240	180	35	250	100	300
33	2,6	1000	120	300	200	30	375	120	400
34	2,7	4000	140	220	220	25	250	60	500
35	2,1	3000	180	240	180	-20	375	60	300
36	2,2	2000	100	260	200	-25	375	80	400
37	2,3	1000	120	200	220	-30	375	90	500
38	2,4	2000	140	220	160	60	375	100	300

Окончание табл.1.2

Вариант	Задача 1. Сталь, $\lambda=40$ Вт/(м·°С)			Задача 2. Бетон, $\lambda= 1,12$ Вт/(м·°С)			Задача 3. Диатомитовый кирпич, ($\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С))		
	δ мм	q , Вт/м ²	t_{c2} °С	δ мм	q , Вт/м ²	t_{c2} °С	δ мм	q , Вт/м ²	t_{c2} °С
39	2,5	4000	160	240	180	50	375	120	400
40	2,6	3000	180	260	200	40	250	60	500
41	2,7	2000	100	200	220	35	250	80	300
42	2,8	4000	120	220	240	30	250	60	400
43	2,9	3000	140	240	260	25	250	80	500
44	3,0	2000	160	260	280	-20	250	90	300
45	2,0	1000	180	200	160	-25	250	100	400
46	2,1	4000	100	220	160	-30	375	120	500
47	2,2	3000	120	240	180	60	375	60	300
48	2,3	2000	140	260	200	50	250	80	400
49	2,4	1000	160	200	220	40	250	90	500
50	2,5	4000	180	220	240	35	250	100	300
51	2,6	3000	100	220	240	30	250	120	400
52	2,7	2000	120	240	260	25	250	60	500
53	1,4	1000	140	260	280	-20	375	80	300
54	1,6	4000	160	200	160	-25	375	90	400
55	1,8	3000	180	220	180	-30	375	90	500
56	2,0	2000	100	240	200	60	250	100	300
57	2,1	1000	120	260	220	50	375	120	400
58	2,2	4000	140	200	240	40	250	60	500
59	2,3	3000	160	240	180	35	375	100	300
60	2,4	2000	180	300	200	30	375	120	400

Задание 1.3. Рассчитать толщину стенки δ мм из материалов, представленных в табл. 1.3 при условиях: плотность теплового потока равна q , Вт/м²; температуры стенки равны t_{c1} и t_{c2}

Таблица 1.3

Варианты задания 1.3

Вариант	Задача 1, сталь , $\lambda=40$ Вт/м·°С			Задача 2, бетон, $\lambda= 1,12$ Вт/(м·°С)			Задача 3, диатомитовый кирпич, ($\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С))		
	t_{c1}	q , Вт/м ²	t_{c2} °С	t_{c1}	q , Вт/м ²	t_{c2} °С	t_{c1}	q , Вт/м ²	t_{c2} °С
1	80	4000	100	25	260	60	100	80	300

Продолжение табл.1.3

Вариант	Задача 1, сталь, $\lambda=40 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$			Задача 2, бетон, $\lambda= 1,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$			Задача 3, диатомитовый кирпич, ($\lambda = 0,11$ $\text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$)		
	t_{c1}	$q,$ Вт/м^2	$t_{c2} \text{°C}$	t_{c1}	$q,$ Вт/м^2	$t_{c2} \text{°C}$	t_{c1}	$q,$ Вт/м^2	$t_{c2} \text{°C}$
2	90	3000	120	20	280	50	120	90	400
3	100	2000	140	20	160	40	60	100	500
4	120	4000	160	20	180	35	80	120	300
5	100	3000	180	25	200	30	90	60	400
6	60	4000	100	20	160	25	100	80	500
7	70	3000	120	30	180	-20	120	90	300
8	100	2000	140	20	200	-25	60	100	400
9	90	4000	160	25	220	-30	80	120	500
10	110	3000	180	20	160	60	90	60	300
11	80	2000	100	20	180	50	100	80	400
12	110	1000	120	20	200	40	120	90	500
13	80	4000	140	25	220	35	80	100	300
14	90	3000	160	20	240	30	90	120	400
15	100	2000	180	30	260	25	100	60	500
16	120	1000	100	20	280	-20	120	80	300
17	100	4000	120	25	160	-25	60	60	400
18	60	3000	140	20	160	-30	80	80	500
19	70	2000	160	20	180	60	90	90	300
20	100	1000	180	20	200	50	100	100	400
21	90	4000	100	25	220	40	120	120	500
22	110	3000	120	20	240	35	60	60	300
23	100	2000	140	25	240	30	100	80	400
24	60	1000	160	20	260	25	120	90	500
25	70	4000	180	20	280	-20	60	100	300
26	80	3000	100	20	160	-25	80	120	400
27	90	2000	120	25	180	-30	90	60	500
28	100	4000	140	20	200	60	100	80	300
29	60	3000	160	30	220	50	120	90	400
30	120	2000	180	20	240	40	80	90	500
32	50	4000	100	10	180	35	90	100	300
33	90	3000	120	15	200	30	100	120	400
34	110	4000	140	10	220	25	200	60	500
35	80	3000	100	20	160	40	100	80	500
36	90	2000	120	20	180	35	120	90	300
37	100	4000	140	25	200	30	60	100	400
38	120	3000	160	20	160	25	80	120	500

Окончание табл.1.3.

Вариант	Задача 1, сталь , $\lambda=40$ Вт/м·°С			Задача 2, бетон, $\lambda= 1,12$ Вт/(м·°С)			Задача 3, диатомитовый кирпич, ($\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С)		
	t_{c1}	$q,$ Вт/м ²	t_{c2} °С	t_{c1}	$q,$ Вт/м ²	t_{c2} °С	t_{c1}	$q,$ Вт/м ²	t_{c2} °С
39	100	4000	180	30	180	-20	90	60	300
40	60	3000	100	20	200	-25	100	80	400
41	70	2000	120	25	220	-30	120	90	500
42	100	4000	140	20	160	60	80	100	300
43	90	4000	160	20	180	50	90	120	400
44	110	3000	180	20	200	40	100	60	500
45	80	2000	100	25	220	35	120	80	300
46	110	4000	120	20	240	30	90	90	300
47	80	3000	140	30	260	25	100	100	400
48	90	4000	160	20	280	-20	120	120	500
49	100	3000	180	25	160	-25	60	60	300
50	120	2000	100	20	160	-30	100	80	400
51	60	4000	140	20	180	60	120	90	500
52	70	3000	160	20	200	50	60	100	300
53	100	4000	180	25	220	40	80	120	400
54	90	3000	100	20	240	35	90	60	500
55	110	2000	120	25	240	30	100	80	300
56	100	4000	140	20	260	25	120	90	400
57	60	3000	160	20	280	-20	80	90	500
58	70	4000	180	20	160	-25	90	100	300
59	80	3000	100	25	180	-30	100	120	400
60	90	2000	120	20	200	60	200	60	500

Задание 1.4. Плоская стенка выполнена из теплоизоляционного материала толщиной δ , мм. Температуры ее поверхностей равны: t_{cm1} , °С и t_{cm2} , °С. Коэффициент теплопроводности шамотного кирпича зависит от температуры и определяется зависимостью $\lambda = a (1 + \beta_{\lambda} t)$ Вт/м·град. Вычислить и изобразить в масштабе распределение температур в стенке.

Таблица 1.4

Варианты задания 1.4

Вариант	δ / шаг, мм	t_{cm1} , °С	t_{cm2} , °С	λ_0 , Вт/м·град.	β_{λ} , град ⁻¹
1	250/25	1700	60	0,84	0,0007

Продолжение табл.1.4

Вариант	δ / шаг, мм	$t_{cm1}, ^\circ\text{C}$	$t_{cm2}, ^\circ\text{C}$	$\lambda_0,$ Вт/м·град.	$\beta_{\lambda}, \text{град}^{-1}$
2	250/25	1600	50	0,78	0,0006
3	250/25	1500	40	0,76	0,0005
4	250/25	1400	60	1,12	0,0008
5	250/25	1300	50	1,04	0,0007
6	250/25	1200	40	0,72	0,0005
7	200/20	1700	80	0,84	0,0006
8	200/20	1600	60	0,78	0,0005
9	200/20	1500	70	0,76	0,0008
10	200/20	1400	50	1,12	0,0007
11	200/20	1300	40	1,04	0,0005
12	200/20	1200	70	0,72	0,0008
13	200/20	1000	50	0,84	0,0007
14	200/20	900	40	0,78	0,0005
15	150/15	850	70	0,78	0,0006
16	150/15	800	50	0,76	0,0005
17	150/15	750	40	1,12	0,0008
18	150/15	780	70	1,04	0,0007
19	150/15	740	50	0,72	0,0005
20	150/15	700	40	0,84	0,0008
21	150/15	850	60	0,78	0,0007
22	150/15	800	80	0,68	0,0005
23	150/15	750	75	0,56	0,0006
24	100/10	780	40	0,46	0,0005
25	100/10	740	70	0,34	0,0008
26	100/10	700	50	0,28	0,0007
27	100/10	600	40	0,12	0,0005
28	100/10	580	70	0,16	0,0008
29	100/10	550	50	0,14	0,0007
30	100/10	500	40	0,08	0,0005
31	100/10	400	60	0,09	0,0005
32	100/10	440	80	0,08	0,0006
33	100/10	460	75	0,07	0,0005
34	100/10	480	70	0,07	0,0008
35	100/10	420	50	0,07	0,0007
36	100/10	400	40	0,07	0,0005
37	100/10	380	60	0,07	0,0008
38	100/10	360	80	0,07	0,0007
39	100/10	320	75	0,07	0,0005
40	200/20	1200	60	0,78	0,0005
41	200/20	1000	70	0,68	0,0006
42	200/20	900	50	0,56	0,0005
43	200/20	850	40	0,46	0,0008
44	200/20	800	70	0,34	0,0007
45	200/20	750	50	0,28	0,0005

Вариант	δ / шаг, мм	$t_{cm1}, ^\circ\text{C}$	$t_{cm2}, ^\circ\text{C}$	$\lambda_0,$ Вт/м·град.	$\beta_{\lambda}, \text{град}^{-1}$
46	200/20	780	40	0,12	0,0008
47	200/20	740	70	0,78	0,0007
48	150/15	700	50	0,68	0,0005
49	150/15	850	40	0,56	0,0005
50	150/15	800	70	0,46	0,0006
51	150/15	750	50	0,34	0,0005
52	150/15	780	40	0,28	0,0008
53	150/15	740	60	0,12	0,0007
54	150/15	700	80	0,16	0,0005
55	150/15	600	75	0,14	0,0008
56	150/15	580	40	0,08	0,0007
57	100/10	550	70	0,09	0,0005
58	100/10	700	70	0,08	0,78
59	100/10	850	50	0,07	0,68
60	100/10	800	40	0,07	0,56

1.4. Теплопроводность многослойной плоской стенки

Многослойная плоская стенка состоит, например, из трех слоев,

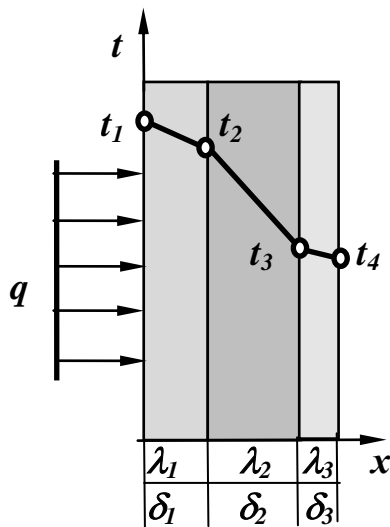


Рис.1.2 Схема теплопроводности через многослойную плоскую стенку

В общем виде для n - слойной стенки можно записать

$$q = \Delta t / \sum_{i=1}^{i=n} (\delta_i / \lambda_i). \quad [1.5].$$

Для каждого слоя определяются температуры

$$t_2 = t_1 - q \delta_1 / \lambda_1; \quad t_3 = t_2 - q \delta_2 / \lambda_2;$$

$$t_3 = t_1 - q (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2) = t_4 + q \delta_3 / \lambda_3;$$

Внутри каждого слоя температура изменяется по закону прямой линии.

В некоторых случаях многослойную стенку рассматривают как однослойную с такой же толщиной

$$\Delta = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i.$$

, которые плотно прилегают друг к другу и имеет соответствующие толщины и теплопроводности.

Известны температуры на внешних поверхностях многослойной стенки. t_1 ; t_4 температуры соприкасающихся слоев; t_2 ; t_3 не известны. На основании

формулы [1.2] для каждого слоя можно написать $q = [\lambda_1 (t_1 - t_2)]/\delta_1$; $q = [\lambda_2 (t_2 - t_3)]/\delta_2$; $q = [\lambda_3 (t_3 - t_4)]/\delta_4$; После соответственного сложения правых с правыми и левых с левыми частями этих уравнений получим

$$t_1 - t_4 = \Delta t = q[\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3],$$

$$\text{откуда } q = \Delta t / (\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3) \quad [1.6]$$

При этом в расчет вводится эквивалентная теплопроводность, определяемая по формуле

$$\lambda_{\text{экв}} = \Delta / \sum_{i=1}^{i=n} (\delta_i/\lambda_i) \quad [1.7]$$

1.5. Варианты решения задач теплопроводности через многослойную плоскую стенку

Пример 1. Решено уменьшить толщину слоя красного кирпича в стенке топочной камеры, рассмотренной в задаче 2.3, в два раза, между слоями поместить слой засыпки из диатомитовой крошки, коэффициент теплопроводности которой составляет $\lambda_2 = 0,11 + 0,00022 t$, Вт/м·К. Какой нужно сделать толщину засыпки, чтобы при тех же температурах на внутренней и внешней поверхностях стенки, теплотери остались неизменными ?

Решение

Так как $q = \text{const}$, то температуру в плоскости соприкосновения диатомитовой засыпки определим по уравнению: $t_{cm3} = t_{cm4} + q \frac{\delta_2}{\lambda_2}$

Среднее значение коэффициента теплопроводности диатомитовой засыпки найдется по уравнению $\lambda_{\text{cp}} = \lambda_0 + \beta_{\lambda} \frac{t_{c3} + t_{c4}}{2}$

Тогда толщина засыпки будет равна: $\delta = \frac{\Delta t_{\text{зас}}}{q} \lambda_{\text{ch}}$

Задача 1. Стены сушильной камеры выполнены из слоя красного кирпича ($\delta_1 = 250$ мм, $\lambda_2 = 0,7$, Вт/м·К) и слоя строительного войлока ($\lambda_2 = 0,0465$, Вт/м·К). Внутренняя температура равна $t_{cm1} = 110$ °С ; наружная - $t_{cm3} = 25$ °С. Вычислить температуру в плоскости соприкосновения слоев и найти толщину войлочного слоя при условии, чтобы тепловые потери через 1 м^2 стенки камеры не превышали 80 Вт/м^2

Задача 2. Обмуровка печи состоит из слоев шамотного ($\delta_1 = 250$ мм, $\lambda_1 = 0,93$ Вт/м·К) и красного кирпичей ($\delta_3 = 250$ мм, $\lambda_3 = 0,7$ Вт/м·К), между которыми расположена засыпка из диатомита ($\delta_1 = 100$ мм, $\lambda_3 = 0,14$ Вт/м·К). Какой толщины необходимо сделать слой красного кирпича, чтобы отказаться от засыпки диатомитом и при этом тепловой поток оставить неизменным ?

Задача 3. Стенка топочной камеры парового котла выполнена из пеношамота ($\delta_1= 120$ мм, $\lambda_2= 0,26 + 0,00023 t$, Вт/м·К) и слоя красного кирпича ($\delta_2= 500$ мм, $\lambda_2= 0,7$, Вт/м·К). Внутренняя температура равна $t_{cm1}= 1100$ °С ; наружная - $t_{cm3}= 40$ °С. Вычислить тепловые потери через 1 м^2 стенки топочной камеры и температуру в плоскости соприкосновения слоев.

Задача 4. Плоская стенка стального бака ($\delta_1= 10$ мм, $\lambda_1= 46,5$ Вт/м·К) площадью 6 м^2 покрыта двухслойной теплоизоляцией. Первый слой - новоасбозурит ($\delta_2= 50$ мм, $\lambda_2= 0,144 + 0,00014 t$, Вт/м·К), второй слой - известковая штукатурка ($\delta_3= 10$ мм, $\lambda_3= 0,698$ Вт/м·К). Внутренняя температура равна $t_{cm1}= 250$ °С ; наружная - $t_{cm4}= 50$ °С.

Вычислить тепловой поток через стенку, температуры на границах слоев изоляции и распределение температур в теплоизоляции.

Задание 1.5. Рассчитать потери тепла через единицу поверхности, температуру между слоями трехслойной стенки и построить график распределения температур в слоях при условии: 1 слой (δ_1 , мм ; $\lambda_1=\lambda_{01} + 0,0006t$, Вт/м·К); 2 слой (δ_2 , мм ; $\lambda_2=\lambda_{02} + 0,00015t$, Вт/м·К); 1 слой (δ_3 , мм ; λ_3 , Вт/м·К). Внутренняя температура равна t_{cm1} , °С ; наружная - t_{cm4} , 50 °С. Исходные данные по вариантам представлены в табл. 1.5

Таблица 1.5

Варианты задания 1.5

Вариант	t_{cm1} , °С	t_{cm4} , °С	δ_1 , мм	λ_{01} , Вт/м·К	δ_2 , мм	λ_{02} , Вт/м·К	δ_3 , мм	λ_{03} , Вт/м·К
1	600	40	120	0,84	250	0,34	120	0,78
2	580	70	120	0,78	250	0,28	120	0,68
3	550	50	120	0,76	250	0,12	120	0,56
4	500	40	120	1,12	250	0,16	120	0,46
5	1700	60	120	1,04	250	0,14	120	0,34
6	1600	50	120	0,72	250	0,08	125	0,28
7	1500	40	120	0,84	250	0,09	125	0,78
8	1400	60	120	0,78	250	0,08	125	0,68
9	1300	50	125	0,78	250	0,34	125	0,56
10	1200	40	125	0,76	250	0,28	125	0,46
11	700	40	125	1,12	250	0,12	125	0,34
12	850	60	125	1,04	250	0,16	125	0,28
13	800	80	125	0,72	250	0,14	125	0,78
14	750	75	125	0,84	250	0,08	120	0,68
15	780	40	125	0,78	250	0,09	125	0,56

Продолжение табл.1.5

Вариант	$t_{cm1},$ °C	$t_{cm4},$ °C	δ_1 , мм	λ_{01} , Вт/м·К	δ_2 , мм	λ_{02} , Вт/м·К	δ_3 , мм	λ_{03} , Вт/м·К
16	740	70	125	0,68	250	0,08	120	0,46
17	1700	80	120	0,46	250	0,34	120	0,78
18	1600	60	120	0,34	250	0,28	120	0,68
19	1500	70	120	1,12	250	0,12	120	0,56
20	1400	50	120	1,04	250	0,16	120	0,46
21	1300	40	120	0,72	250	0,14	120	0,34
22	1200	70	120	0,84	250	0,08	120	0,28
23	1000	50	120	0,78	250	0,09	125	0,78
24	900	40	120	0,78	250	0,08	125	0,68
25	850	70	125	0,76	250	0,34	125	0,56
26	800	50	125	1,12	250	0,28	125	0,46
27	750	40	125	1,04	250	0,12	125	0,34
28	780	70	125	0,72	250	0,16	125	0,28
29	740	50	125	0,84	250	0,14	125	0,78
30	700	40	125	0,78	250	0,08	125	0,68
31	850	60	125	0,68	250	0,09	120	0,56
32	800	80	125	0,76	250	0,08	120	0,46
33	750	75	120	1,12	250	0,34	120	0,34
34	780	40	120	1,04	250	0,28	120	0,28
35	740	70	120	0,72	250	0,12	120	0,68
36	700	50	120	0,84	250	0,16	120	0,56
37	600	40	120	0,78	250	0,14	125	0,46
38	580	70	120	0,68	250	0,08	125	0,34
39	550	50	120	0,76	250	0,09	125	0,28
40	500	40	120	1,12	250	0,08	125	0,78
41	400	60	125	1,04	250	0,28	125	0,68
42	440	80	125	0,72	250	0,12	125	0,56
43	460	75	125	0,84	250	0,16	125	0,46
44	480	70	125	0,78	250	0,14	125	0,7
45	380	60	125	0,76	250	0,34	120	0,68
46	360	80	125	1,12	250	0,28	120	0,56
47	320	75	120	1,04	250	0,12	120	0,46
48	1700	80	120	0,72	250	0,16	120	0,34
49	1600	60	120	0,84	250	0,14	120	0,28
50	1500	70	120	0,78	250	0,08	120	0,78
51	1400	50	120	0,68	250	0,09	120	0,68
52	1300	40	120	0,72	250	0,08	120	0,56
53	1200	70	120	0,84	250	0,34	125	0,46

Вариант	$t_{cm1},$ °C	$t_{cm4},$ °C	$\delta_1,$ мм	$\lambda_{01},$ Вт/м·К	$\delta_2,$ мм	$\lambda_{02},$ Вт/м·К	$\delta_3,$ мм	$\lambda_{03},$ Вт/м·К
54	1000	50	120	0,78	250	0,28	125	0,68
55	900	40	125	0,78	250	0,12	125	0,56
56	850	70	125	0,76	250	0,16	125	0,46
57	800	50	125	1,12	250	0,14	125	0,34
58	750	40	125	1,04	250	0,08	125	0,28
59	780	70	125	0,72	250	0,09	125	0,78
60	740	50	120	0,84	250	0,08	125	0,68

1.6. Теплопроводность через цилиндрическую и шаровую стенки.

Задаются граничные условия первого рода. Задан стационарный процесс теплопроводности в трубе с геометрическими размерами по внутреннему диаметру $d_1 = 2r_1$ и наружному диаметру $d_2 = 2r_2$. На поверхности стенки заданы постоянные температуры $t_{c1}; t_{c2}$. λ - величина постоянная. Необходимо найти распределение температур в стенке и тепловой поток. Для решения поставленной задачи дифференциальное уравнение теплопроводности записывается в цилиндрической системе координат.

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad [1.8]$$

при этом ось Oz совмещена с осью трубы. При заданных условиях температура изменяется только в радиальном направлении, температурное

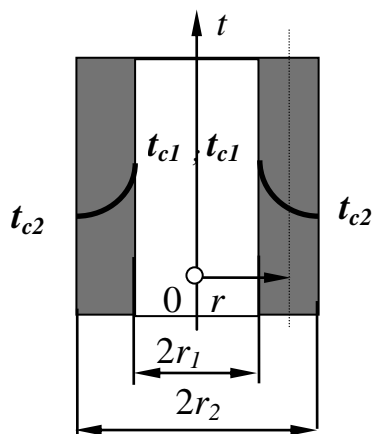


Рис.1.3. Схема теплопроводности цилиндрической стенки

поле будет одномерным:

$\frac{\partial t}{\partial z} = 0; \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$. Температуры на наружной и внутренней поверхностях неизменны, изотермические поверхности являются цилиндрическими, имеющими общую ось. Тогда температура не должна изменяться вдоль φ (вдоль окружности при смещении на градус φ).

Т.е. $\frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0; \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0$. И с учетом этих выражений уравнение [1.9] примет

вид $\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = 0$, (оператор Лапласа) [1.10]. При стационарном тепловом режиме $\partial t / \partial \tau = 0$. Дифференциальное уравнение теплопроводности

примет вид $\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0$ [1.11].

Граничные условия: при $r = r_1$ $t = t_{c1}$; при $r = r_2$ $t = t_{c2}$ [1.12]. Вводим новую переменную $u = \frac{\partial t}{\partial r}$ и получаем уравнение в новых переменных

$\frac{d u}{dr} + \frac{1}{r} u = 0$. Разделим переменные $\frac{du}{u} + \frac{dr}{r} = 0$, после интегрирования по-

лучим $\ln u + \ln r = \ln C_1$. Потенцируя уравнение получим $u = C_1/r$. Приравнивая значения $u = dt/dr$ и $u = C_1/r$ определяем зависимость температуры от координаты $dt/dr = C_1/r$ и $t(r) = C_1 \ln r + C_2$ [1.13]. Из этого уравнения следует, что кривая распределения температур по толщине цилиндрической стенки представляет собой логарифмическую кривую. Постоянные C_1 и C_2 определяются из граничных условий, т.е. $t_{c1} = C_1 \ln r_1 + C_2$; $t_{c2} = C_1 \ln r_2 + C_2$.

После решения пары этих уравнений относительно C_1 и C_2 , подстановки их в уравнение [1.13], определяем температуру t в любой точке стенки цилиндра

$$t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{или} \quad t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln \frac{d}{d_1}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad [1.14]$$

Количество теплоты, проходящей через цилиндрическую поверхность площадью $F = 2\pi rL$ определяется из закона Фурье и получим:

$Q = -\lambda 2\pi rL \tau \frac{dt}{dr}$, градиент температуры определен как

$u = \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{C_1}{r} = -\frac{t_c' - t_c''}{r \ln(r_2/r_1)}$; после подстановки значения градиента температу-

ры получим выражение для теплопроводности

$Q = \lambda 2\pi rL \tau \frac{t_c' - t_c''}{r \ln(r_2/r_1)}$ [1.15]. Плотность теплового потока относят к единицы

длины в единицу времени $q = \lambda 2\pi \frac{t_c' - t_c''}{\ln(r_2/r_1)}$ [1.16]. Для тонких труб большо-

го диаметра, когда $d_2/d_1 < 2$ тепловой поток можно считать по уравнениям для плоской стенки. В этом случае ошибка составит менее 4 %.

Для расчета теплопроводности многослойной цилиндрической стенки при условии ограничений совершенного контакта между слоями и постоянства теплопроводности внутри слоя. получим для каждого слоя:

$$q_l = \lambda_1 2\pi \frac{t_c' - t_{c,1}}{\ln(r_2/r_1)}; q_l = \lambda_2 2\pi \frac{t_{c,1} - t_{c,2}}{\ln(r_3/r_2)} \dots q_l = \lambda_n 2\pi \frac{t_{c,n} - t_c''}{\ln(r_n/r_{n-1})} \quad [1.17] \quad \text{Тогда для } n\text{-}$$

слойной стенки получим
$$q = \frac{(t_c' - t_c'')}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad [1.18]$$

Для решения задачи теплопроводности через шаровую стенку рассматривается полый шар с радиусами r_1 и r_2 . с постоянной теплопроводностью материала λ и температурами поверхности t_{c1} и t_{c2} так как температура изменяется только в радиальном направлении, то дифференциальное уравнение теплопроводности в сферических координатах будет:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad [1.19], \quad \text{где} \quad \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) = \nabla^2 t \quad [1.20], \quad \text{- оператор Лапласа в}$$

сферических координатах. При стационарном тепловом режиме температура не зависит от времени $\partial t / \partial \tau = 0$ и уравнение [1.21], примет

$$\text{вид} \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} \right) = 0 \quad [1.22]$$

Граничные условия первого рода: при $r = r_1$ $t = t_{c1}$; при $r = r_2$ $t = t_{c2}$

Дважды интегрируя уравнение теплопроводности [1.22] получим

$$\frac{dt}{dr} = \frac{C_1}{r^2}; \quad t(r) = C_2 - \frac{C_1}{r} \quad [1.23]. \quad \text{Определим постоянные интегрирования}$$

из граничных условий: $C_1 = -\frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}; C_2 = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \frac{1}{r_1}$, подставляя зна-

чения постоянных получаем выражение для температурного поля в сферической стенке

$$t(r) = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [1.24].$$

Тепловой поток найдем, подставив градиент температур dt/dr в уравнение закона Фурье при площади изотермической поверхности $F = 4\pi r^2$

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} F = \frac{\lambda}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} (t_{c1} - t_{c2}) 4\pi = \frac{\lambda r_1 r_2}{r_1 - r_2} (t_{c1} - t_{c2}) 4\pi \quad [1.25]. \quad \text{Обозначая } \delta = r_1 - r_2,$$

$$r_{cp} = \sqrt{r_1 r_2} \text{ и } F = 4\pi r_{cp}^2 \text{ получаем расчетную формулу } Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) F_{cp} \quad [1.26].$$

1.7. Варианты решения задачи теплопроводности через многослойную цилиндрическую стенку

Задание 1.6. Труба с внутренним диаметром 400 мм, толщиной δ_1 и теплопроводностью λ_1 , имеющая внутреннюю температуру t_{cm1} , покрыта первым слоем теплоизоляции δ_2 с λ_2 и вторым слоем теплоизоляции δ_3 и λ_3 , имеющем наружную температуру t_{cm2} . Определить потери тепла на 1 погонном метре трубы в соответствии с вариантами, представленными в табл. 1.6

Таблица 1.6

Варианты задания 1.6

Вариант	$t_{cm1},$ °C	$t_{cm2},$ °C	δ_1 , мм	λ_{01} , Вт/м·К	δ_2 , мм	λ_{02} , Вт/м·К	δ_3 , мм	λ_{03} , Вт/м·К
1	1700	80	120	0,46	250	0,34	120	0,78
2	1600	60	120	0,34	250	0,28	120	0,68
3	1500	70	120	1,12	250	0,12	120	0,56
4	1400	50	120	1,04	250	0,16	120	0,46
5	1300	40	120	0,72	250	0,14	120	0,34
6	1200	70	120	0,84	250	0,08	120	0,28
7	1000	50	120	0,78	250	0,09	125	0,78
8	900	40	120	0,78	250	0,08	125	0,68
9	850	70	125	0,76	250	0,34	125	0,56
10	800	50	125	1,12	250	0,28	125	0,46
11	750	40	125	1,04	250	0,12	125	0,34
12	780	70	125	0,72	250	0,16	125	0,28
13	740	50	125	0,84	250	0,14	125	0,78
14	700	40	125	0,78	250	0,08	125	0,68
15	850	60	125	0,68	250	0,09	120	0,56
16	800	80	125	0,76	250	0,08	120	0,46
17	780	40	120	1,04	250	0,28	120	0,28
18	740	70	120	0,72	250	0,12	120	0,68
19	700	50	120	0,84	250	0,16	120	0,56

Продолжение табл. 1.6

Вариант	$t_{cm1},$ °C	$t_{cm4},$ °C	$\delta_1,$ мм	$\lambda_{01},$ Вт/м·К	$\delta_2,$ мм	$\lambda_{02},$ Вт/м·К	$\delta_3,$ мм	$\lambda_{03},$ Вт/м·К
20	600	40	120	0,78	250	0,14	125	0,46
21	580	70	120	0,68	250	0,08	125	0,34
22	550	50	120	0,76	250	0,09	125	0,28
23	500	40	120	1,12	250	0,08	125	0,78
24	400	60	125	1,04	250	0,28	125	0,68
25	440	80	125	0,72	250	0,12	125	0,56
26	460	75	125	0,84	250	0,16	125	0,46
27	480	70	125	0,78	250	0,14	125	0,7
28	380	60	125	0,76	250	0,34	120	0,68
29	360	80	125	1,12	250	0,28	120	0,56
30	320	75	120	1,04	250	0,12	120	0,46
31	1700	80	120	0,72	250	0,16	120	0,34
32	1600	60	120	0,84	250	0,14	120	0,28
33	1500	70	120	0,78	250	0,08	120	0,78
34	1400	50	120	0,68	250	0,09	120	0,68
35	1300	40	120	0,72	250	0,08	120	0,56
36	1200	70	120	0,84	250	0,34	125	0,46
37	1000	50	120	0,78	250	0,28	125	0,68
38	900	40	125	0,78	250	0,12	125	0,56
39	1600	50	120	0,72	250	0,08	125	0,28
40	1500	40	120	0,84	250	0,09	125	0,78
41	1400	60	120	0,78	250	0,08	125	0,68
42	1300	50	125	0,78	250	0,34	125	0,56
43	1200	40	125	0,76	250	0,28	125	0,46
44	700	40	125	1,12	250	0,12	125	0,34
45	850	70	125	0,76	250	0,16	125	0,46
46	800	50	125	1,12	250	0,14	125	0,34
47	750	40	125	1,04	250	0,08	125	0,28
48	780	70	125	0,72	250	0,09	125	0,78
49	740	50	120	0,84	250	0,08	125	0,68
50	600	40	120	0,84	250	0,34	120	0,78
51	580	70	120	0,78	250	0,28	120	0,68
52	550	50	120	0,76	250	0,12	120	0,56
53	500	40	120	1,12	250	0,16	120	0,46
54	1700	60	120	1,04	250	0,14	120	0,34
55	780	60	120	1,12	250	0,08	120	0,56
56	740	80	120	1,04	250	0,09	120	0,46
57	600	75	120	0,72	250	0,08	120	0,34

Окончание табл. 1.6

Вариант	$t_{cm1},$ °C	$t_{cm4},$ °C	δ_1 , мм	λ_{01} , Вт/м·К	δ_2 , мм	λ_{02} , Вт/м·К	δ_3 , мм	λ_{03} , Вт/м·К
58	580	70	125	0,84	250	0,28	120	0,28
59	550	60	125	0,78	250	0,12	120	0,78
60	500	80	125	0,76	250	0,16	120	0,68

1.8. Вопросы для самопроверки

1. Понятие о теплотехнике и принципиальных направлениях использования теплоты.
2. Теплопроводность, понятие о температурном поле, градиенте, потоке.
3. Стационарная теплопроводность однородной однослойной плоской стенки. Граничные условия первого рода.
4. Стационарная теплопроводность однослойной цилиндрической стенки. Граничные условия первого рода.
5. Стационарная теплопроводность однослойной шаровой стенки. Граничные условия первого рода.
6. Стационарная теплопроводность многослойной плоской стенки. Граничные условия первого рода.
7. Стационарная теплопроводность многослойной цилиндрической стенки.

Глава 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

2.1. Конвективный теплообмен

Конвективным теплообменом называется процесс передачи тепла при омывании теплоносителем стенки. Процесс передачи тепла в этом случае осуществляется как за счет теплопроводности, так и конвекции. На процесс теплоотдачи влияют факторы:

- 1) природа возникновения движения жидкости вдоль стенки (свободное и вынужденное), свободное движение - естественная конвекция, обусловлена различием в плотности слоев жидкости из-за различия в температуре; вынужденное движение - перемещение жидкости вентиляторами, насосами (движущая сила возникает за счет разности давлений).
- 2) режим движения жидкости (ламинарный и турбулентный). При ламинарном режиме средняя скорость в 2 раза меньше максимальной скорости движения потока вдоль стенки, при турбулентном - 1,2 - 1,3 раза.

Рейнольдс установил, что для течения жидкости в трубе при значениях комплекса $wd\rho/\mu$ менее 2300 - поток ламинарный, более 10000 - поток турбулентный, между ними - переходный режим. Здесь w - средняя скорость, d - диаметр трубы, ρ - плотность жидкости, μ - динамическая вязкость жидкости. Длина участка стабилизации для ламинарного режима составляет $0,03 d$, для турбулентного - $40 d$. Режим движения жидкости определяет механизм переноса теплоты. При ламинарном режиме перенос осуществляется за счет теплопроводности; при турбулентном - путем конвекции (лишь в приграничном ламинарном слое - теплопроводностью). Температура в тепловом пограничном слое при ламинарном режиме практически совпадает с характером распределения скоростей потока, при турбулентном - температура распределяется полого лишь в пристенном ламинарном слое, который имеет значительно меньшую толщину, чем в ламинарном.

- 3) Физические свойства жидкости (λ , ρ , μ , c , температуропроводность). μ - динамическая вязкость характеризует силу трения между соседними слоями на ед. поверхности, $\nu = \mu / \rho$ - кинематическая вязкость.
- 4) Форма, размеры, состояние поверхности стенки, омываемой жидкостью.

Для расчета теплового потока используют уравнение Ньютона $Q = \alpha \Delta t S$, $q = \alpha \Delta t$ [2. 1] ; $\alpha = \lambda / \delta_{\text{погр. слоя}}$ - коэффициент теплоотдачи (тепло-

обмена, в строительной технике называется коэффициентом теплоперехода или тепловосприятости). Δt - температурный напор.

Дифференциальное уравнение теплообмена описывает, согласно закона Фурье, процесс теплоотдачи на границах тела $-\lambda \frac{dt}{dn} = \alpha \Delta t$ или

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\Delta t} \frac{dt}{dn} \quad [2.2]$$

Для нахождения α необходимо знать температурный градиент, распределение температур в жидкости. Определение α и теплового потока на поверхности теплообмена является основной задачей теории конвективного теплообмена, которая решается с помощью основ теории подобия, её критериев.

При решении данной задачи принимаются условия: тело омывается несжимаемой жидкостью, имеющую температуру и скорость вдали от тела постоянными и равными соответственно t_0 и w_0 . Размер тела l_0 задан и имеет постоянную величину для данного случая. Температура поверхности тела равна t_c Для определенности примем $t_c > t_0$.

Полагаем, что физические параметры жидкости постоянны (учитываем только подъемную силу, возникающую в результате зависимости плотности от температуры). Теплота трения не учитывается, процесс стационарный. Ось Oy нормальна к поверхности тела. Ось Ox направлена вдоль тела и вертикальна, при этом $g_x = g$, а проекции вектора сил тяжести (или подъемной силы) на оси Ox и Oz равны нулю ($g_x = g_z = 0$) Размер тела вдоль оси Oz намного больше l_0

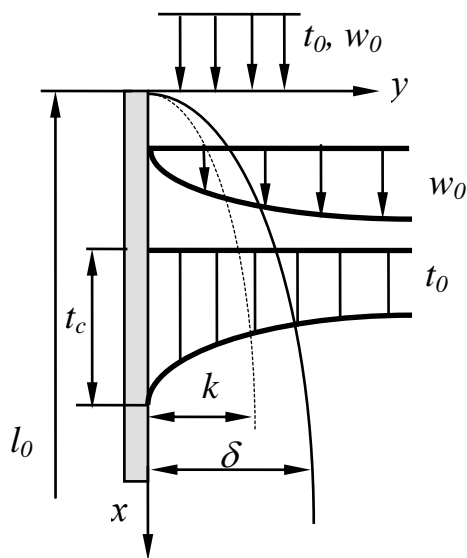


Рис.2.1 Схема теплоотдачи

Дополнительная подъемная сила определяется по уравнению $\rho g \beta \vartheta$, считая ее соизмеримой с вязкостным членом $\mu(\partial^2 w_x / \partial y^2)$. Обозначим $\vartheta = t - t_0$, где t - температура жидкости. При $t_0 = const$ $dt = d\vartheta$.

В дифференциальной форме уравнение энергии примет вид:

$$w_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \quad [2.3]$$

уравнение движения:

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + g \beta \vartheta \quad [2.4]$$

уравнение сплошности потока:
$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0 \quad [2.5]$$

При граничных условиях: 1) вдали от тела ($y=\infty$) $\mathcal{G} = \mathcal{G}_0 \equiv 0$; $w_x=w_0$; $w_y=0$
 2) на поверхности тела ($y=0$, $0 \leq x \leq 1$, $-\infty \leq z \leq +\infty$)
 $\mathcal{G} = \mathcal{G}_c \equiv t_c - t_0 = const$; $w_x=w_y=0$

Здесь независимые переменные координаты: x, y

Зависимые переменные: \mathcal{G}, w_x и w_y

Постоянные величины: $w_0; t_0; l_0; \mathcal{G}_c, \nu, g\beta$

Искомые переменные величины $w_x; w_y; \mathcal{G}$ зависят от большого числа переменных и постоянных величин, входящих в условие однозначности. Все величины, входящие в перечисленные уравнения можно сгруппировать в комплексы, и количество безразмерных комплексов будет меньше числа размерных величин. Для приведения к безразмерному виду выбирают масштаб: для линейных - длину поверхности теплообмена l_0 , скорость w_0 , температуру \mathcal{G}_c .

Обозначим безразмерные величины:

$$X = \frac{x}{l_0}; Y = \frac{y}{l_0}; W_x = \frac{w_x}{w_0}; W_y = \frac{w_y}{w_0}; \Theta = \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{G}_c} \quad [2.6]$$

Граничные условия в безразмерном виде будут выглядеть: 1) вдали от тела $\Theta = \Theta_0 = 0$; $W_x=1, W_y=0$ 2) на поверхности тела ($Y=0, 0 \leq X \leq 1$) $\Theta = \Theta_0 = 1$; $W_x= W_y=0$

При известном температурном поле коэффициент теплоотдачи определяется

$$-\frac{\lambda}{t_c - t_0} \left(\frac{dt}{dy} \right)_{y=0} = \alpha \quad [2.7]$$

Приведя выражение к безразмерному виду имеем
$$\frac{\alpha \cdot l_0}{\lambda} = - \left(\frac{\partial \Theta}{\partial Y} \right)_{Y=0} \quad [2.8]$$

Вопросы для самоподготовки

1. Конвективный теплообмен. Факторы, влияющие на процесс теплоотдачи..
2. Уравнение Ньютона для расчета теплового потока теплоотдачей. Дифференциальное уравнение теплообмена.
3. Постановка и условия решения задачи для определения коэффициента теплоотдачи α .

4. Дифференциальные формы уравнений энергии, движения, сплошности потока при решении задачи определения коэффициента теплоотдачи α .
5. Граничные условия при решении задачи определения коэффициента теплоотдачи α . Безразмерные величины.
6. Дифференциальное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи. Выражение дифференциального уравнения в безразмерном виде и вынужденной конвекции.

2.2. Теплопередача через плоскую стенку в граничных условиях третьего рода.

При решении задач тепловых процессов, происходящих в тепловых агрегатах промышленности тугоплавких материалов реализуются тепловые процессы в граничных условиях третьего рода. Передача теплоты из одной среды (жидкости или газа) к другой через разделяющую их однослойную или многослойную стенку называется **теплопередачей**. Теплопередача включает в себя теплоотдачу от более горячей жидкости (газа) к стенке, теплопроводность в стенке, теплоотдачу от стенки к более холодной среде.

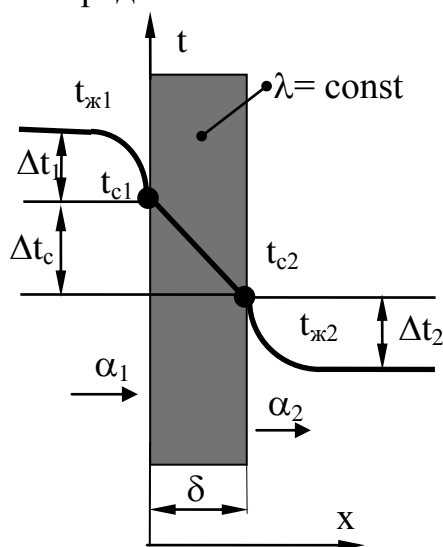


Рис.2.2. Схема теплопередачи

Плоская однородная стенка имеет толщину δ с теплопроводностью λ , заданы температуры окружающей среды $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$, а также коэффициенты теплоотдачи α_1 , α_2 . Считаем, что эти величины постоянны и не меняются вдоль поверхности. Это позволяет рассматривать изменение температуры жидкости (газа) и стенки только в направлении перпендикулярном поверхности. Плотность теплового потока от горячей жидкости к стенке определяется уравнением $q = \alpha_1 (t_{ж1} - t_{c1})$ [2.9], при стационарном режиме та же плотность теплового

потока, обусловленная теплопроводностью через стенку $q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2})$

[2.10], тот же тепловой поток передается от второй поверхности к холодной жидкости за счет теплоотдачи $q = \alpha_2 (t_{c2} - t_{ж2})$ [2.11]. Уравнения

[2.9] - [2.11] можно записать в виде $q \frac{1}{\alpha_1} = (t_{ж1} - t_{c1})$ [2.12];

$q \frac{\delta}{\lambda} = (t_{c1} - t_{c2})$ [2.13]; $q \frac{1}{\alpha_2} = (t_{c2} - t_{ж2})$ [2.14]. После сложения правых и

левых частей получим $q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = (t_{ж1} - t_{ж2})$ [2.15] или $q = (t_{ж1} - t_{ж2})$

$/ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$, обозначим $k = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$; тогда $q = k (t_{ж1} - t_{ж2})$. Ве-

личина k имеет ту же размерность, что и α , и называется коэффициентом теплопередачи. Коэффициент теплопередачи характеризует интенсивность передачи теплоты от одной жидкости к другой через разделяющую стенку и численно равен количеству теплоты, которое передается через единицу поверхности стенки в единицу времени при разности температур между жидкостями в один градус.

Величина обратная коэффициенту теплопередачи, называется *полным термическим сопротивлением* $R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$ [2.16]. Общее

термическое сопротивление складывается из термических сопротивлений теплоотдачи и термического сопротивления теплопроводности стенки. Если стенка состоит из нескольких слоев, то в общем виде термическое со-

противление будет определяться по формуле $R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}$ [2.17]

. Исходя из представленных расчетов и формул для многослойной стенки, в общем виде температура на границе любых двух слоев i и $i+1$ при граничных условиях третьего рода может быть определена по уравнению

$$t_{c(i+1)} = t_{ж1} - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)$$

2.3. Задания и варианты решения задачи теплопроводности через многослойную плоскую стенку

Задание 2.1 Вычислить тепловой поток через 1 м^2 чистой поверхности нагрева парового котла и температуры на поверхности стенки t'_c, t''_c если заданы следующие величины: температура газов теплоносителя $t_1 = 900^\circ\text{C}$, температура нагретой воды $t_2 = 160^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от

газов к стенке $\alpha_1 = 100 \text{ Вт/м}^2\text{К}$; от стенки к воде $\alpha_2 = 5000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 50 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, толщина стенки 10 мм.

Задание 2.2. Вычислить тепловой поток через 6 м^2 чистой поверхности нагрева печи и температуры на поверхности стенки t'_c, t''_c если заданы следующие величины: температура газов теплоносителя $t_1 = 600^\circ\text{С}$, температура нагретого воздуха $t_2 = 20^\circ\text{С}$, коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha_1 = 100 \text{ Вт/м}^2\text{К}$; от стенки к воздуху $\alpha_2 = 7,5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Коэффициент теплопроводности красного кирпича $\lambda_1 = 0,7 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, толщина стенки $\delta_1 = 250 \text{ мм}$.

Задание 2.3. Вычислить температуру воздуха в помещении t_2 при условиях задачи 4.2 и неизменном тепловом потоке, если печь облицована керамической плиткой ($\lambda_3 = 1,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $\delta_3 = 8 \text{ мм}$.) при креплении на цементную стяжку ($\lambda_2 = 0,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $\delta_2 = 12 \text{ мм}$), коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $\alpha_2 = 12 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Задание 2.4 Определить тепловой поток через 1 м^2 стены (λ_2 , $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$; δ_2 , мм), если она изнутри покрыта “жидкими” обоями ($\lambda_1 = 0,2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $\delta_1 = 4 \text{ мм}$.), а снаружи оштукатурена теплоизоляционной штукатуркой (λ_3 , $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$; δ_3 , мм.). Температура воздуха внутри помещения t_1 , снаружи помещения t_2 . Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности $\alpha_1 = 8,0 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, коэффициент теплоотдачи от стенки к наружному воздуху $\alpha_2 = 18,0 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Варианты исходных данных представлены в табл.2.1

Таблица 2.1

Варианты задания 2.4.

Вариант	λ_2 , Вт/м·К	δ_2 , мм	λ_3 , Вт/м·К	δ_3 , мм	t_1 , °С	t_2 , °С
1	0,7	500	0,07	20	26	10
2	0,75	500	0,06	25	24	0
3	0,6	500	0,08	15	22	-10
4	0,65	500	0,09	10	24	-20
5	0,5	370	0,1	20	26	-30
6	0,55	370	0,07	25	22	6
7	0,4	370	0,06	15	24	10
8	0,45	370	0,08	10	28	-20
9	0,3	300	0,09	20	26	10
10	0,2	300	0,1	25	24	0
11	0,25	300	0,06	15	22	-10
12	0,15	200	0,08	10	24	-20

Продолжение табл. 2.1

Вариант	λ_2 , Вт/м·К	δ_2 , мм	λ_3 , Вт/м·К	δ_3 , мм	t_1 , °С	t_2 , °С
13	0,12	200	0,09	25	26	-30
14	0,65	500	0,1	15	22	6
15	0,5	500	0,07	10	24	10
16	0,55	500	0,06	20	28	-20
17	0,4	500	0,08	25	24	10
18	0,45	370	0,09	15	22	0
19	0,3	370	0,1	10	24	-10
20	0,2	370	0,06	20	26	-20
21	0,25	370	0,08	25	22	-30
22	0,15	300	0,09	15	24	6
23	0,12	300	0,1	10	28	10
24	0,6	300	0,07	25	26	-20
25	0,65	200	0,06	15	24	0
26	0,5	200	0,08	10	22	-10
27	0,45	500	0,06	15	22	6
28	0,3	500	0,08	10	24	10
29	0,2	370	0,09	20	28	-20
30	0,25	370	0,1	25	24	10
31	0,15	370	0,07	15	22	0
32	0,12	370	0,06	10	24	-10
33	0,65	300	0,08	25	26	-20
34	0,5	300	0,09	15	22	-30
35	0,55	300	0,1	10	24	6
36	0,4	200	0,06	20	28	10
37	0,45	200	0,08	25	26	-20
38	0,3	500	0,09	15	24	10
39	0,2	500	0,1	10	22	0
40	0,25	500	0,07	20	24	-10
41	0,15	500	0,06	25	26	-20
42	0,12	370	0,08	15	22	-30
43	0,6	370	0,09	10	24	6
44	0,65	370	0,1	25	28	0
45	0,5	370	0,06	15	24	-10
46	0,55	300	0,08	10	22	-20
47	0,4	300	0,09	20	24	-30
48	0,45	300	0,1	25	26	6
49	0,3	200	0,07	15	22	10

Окончание табл. 2.1

Вариант	λ_2 , Вт/м·К	δ_2 , мм	λ_3 , Вт/м·К	δ_3 , мм	t_1 , °С	t_2 , °С
50	0,2	200	0,06	10	24	-20
51	0,25	500	0,08	20	28	10
52	0,15	500	0,09	25	26	0
53	0,12	500	0,1	15	24	-10
54	0,65	500	0,06	10	22	-20
55	0,5	370	0,08	25	24	-30
56	0,55	370	0,09	15	26	6
57	0,4	370	0,1	10	22	10
58	0,45	370	0,07	20	24	-20
59	0,3	300	0,06	25	28	10
60	0,2	300	0,08	15	24	0

2.4. Теплопередача через цилиндрическую и шаровую стенки в граничных условиях третьего рода.

Рассмотрим неограниченную цилиндрическую стенку с толщиной $\delta = r_2 - r_1$, заданы температуры теплоносителей t_1 и t_2 (причем $t_1 > t_2$); коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 на поверхностях стенки со стороны горячего и холодного теплоносителей. Напишем уравнение для линейной плотности теплового потока

$$q_l = \alpha_1 (t_1 - t'_c) 2\pi r_1 \quad ; \quad q = \lambda 2\pi \frac{t'_c - t''_c}{\ln(r_2/r_1)} \quad ; \quad q_l = \alpha_2 (t''_c - t_2) \pi r_2.$$

Складываем эти уравнения и решаем относительно разности температур, получаем

$$t_1 - t_2 = q_l \left(1/(\alpha_1 2\pi r_1) + \ln(r_2/r_1)/2\pi\lambda + 1/(\alpha_2 2\pi r_2) \right)$$

откуда:

$$q_l = (t_1 - t_2) : \left(1/(\alpha_1 \pi d_1) + \ln(d_2/d_1)/2\pi\lambda + 1/(\alpha_2 \pi d_2) \right) \quad [2.18]$$

Обозначим:

$$k_l = 1 / \left(1/(\alpha_1 2\pi r_1) + \ln(r_2/r_1)/2\pi\lambda + 1/(\alpha_2 2\pi r_2) \right) \quad [2.19]$$

Величину k_l называют *линейным коэффициентом теплопередачи*. Величина обратная k_l называется полным термическим сопротивлением стенки $R_l = 1/k_l = 1/(\alpha_1 2\pi r_1) + \ln(r_2/r_1)/2\pi\lambda + 1/(\alpha_2 2\pi r_2)$ или

$$R_l = 1/(\alpha_1 \pi d_1) + \ln(d_2/d_1)/2\pi\lambda + 1/(\alpha_2 \pi d_2) = R_{l,1} + R_{lc} + R_{l,2} \quad [2.20]$$

Для многослойной цилиндрической стенки термическое сопротивление определится по формуле $R_{lc}^{mn} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$ Из формулы [2.20] видно, что при постоянном d_1 с увеличением d_2 увеличивается термическое сопротивление R_{lc} , но уменьшается термическое сопротивление со стороны холодного теплоносителя $R_{l,2}$.

Такая, двойного характера, зависимость полного термического сопротивления цилиндрической стенки означает, что существует значение d_2 при котором R_l имеет экстремальное значение. Приравняв первую производную нулю получим: $\frac{dR_l}{d(d_2)} = \frac{1}{2\lambda d_2} - \frac{1}{\alpha_2 d_2^2} = 0$; получим $d_2 = 2\lambda/\alpha_2$ [2.21]

Значению d_2 из уравнения [2.20] соответствует минимальное значение теплового сопротивления R_l . Это значение диаметра называется критическим. При увеличении наружного диаметра до $d_{кр}$ тепловые потери растут. Для уменьшения тепловых потерь изолированным трубопроводом необходимо, чтобы наружный диаметр теплоизоляции был больше $d_{кр}$.

Теплопередача для шаровой стенки при граничных условиях третьего рода уравнение теплопередачи будет

$$Q = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}} \quad [2.22]$$

Уравнение теплопроводности для многослойной стенки

$$Q = \frac{4\pi(t_{c1} - t_{c2})}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\lambda} \frac{r_{i+1} - r_i}{r_i r_{i+1}}} \quad [2.23]$$

где r_i и r_{i+1} - меньший и больший радиус i - того слоя шаровой стенки.

2.5. Вопросы и задачи для самоподготовки

1. Теплопередача, граничные условия третьего рода. Вывод уравнения теплопередачи через плоскую однородную однослойную стенку.
2. Математическое выражение коэффициента теплопередачи. Термическое сопротивление, формулы для определения необходимой толщины стенки при известных коэффициентах теплопроводности и заданном коэффициенте термического сопротивления.
3. Теплопередача через однослойную плоскую стенку в стационарном режиме.

4. Теплопередача через однослойную цилиндрическую стенку в стационарном режиме.
5. Теплопередача через многослойную плоскую стенку в стационарном режиме.
6. Теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку в стационарном режиме
7. Теплопередача через цилиндрическую стенку в граничных условиях третьего рода. Вывод уравнения теплопередачи.
8. Теплопередача через однослойную цилиндрическую стенку. Математическое выражение линейного коэффициента теплопередачи.
9. Теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку. Определение коэффициентов термического сопротивления.
10. Теплопередача через однослойную шаровую стенку, уравнение теплового потока
11. Вывод уравнения для определения критического диаметра при теплопередаче через цилиндрическую стенку в граничных условиях третьего рода.

Задание 2.1 Определить линейную плотность теплового потока в пароперегревателе, выполненного из труб диаметром $d_1/d_2 = 32/40$ мм ($\lambda = 39,5$ Вт/м·К). Внутренняя температура $t_1 = 900^\circ\text{C}$, наружная температура $t_2 = 500^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке $\alpha_1 = 81,5$ Вт/м²·К, от стенки к пару $\alpha_2 = 1163$ Вт/м²·К

Задание 2.2 Определить потерю тепла с 1 пог. м. неизолированного трубопровода $d_1/d_2 = 140/165$ мм ($\lambda_1 = 50$ Вт/м·К), проложенного на открытом воздухе, если внутри протекает вода со средней температурой $t_1 = 90^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $t_2 = -10^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы $\alpha_1 = 1000,0$ Вт/м²·К, от стенки трубы к окружающему воздуху $\alpha_2 = 12,0$ Вт/м²·К. Определить температуры на внутренней и внешней поверхностях стенки трубы.

Задание 2.3 Определить потерю тепла с 1 пог. м. трубопровода $d_1/d_2 = 140/165$ мм ($\lambda_1 = 50$ Вт/м·К), проложенного на открытом воздухе, если внутри протекает вода со средней температурой $t_1 = 90^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $t_2 = -10^\circ\text{C}$ при условии, что он покрыт теплоизоляцией ($\delta_{\text{и}} = 60$ мм; $\lambda_{\text{и}} = 0,09$ Вт/м·К.) Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы $\alpha_1 = 1000,0$ Вт/м²·К, от изоляции к окружающему воздуху $\alpha_2 =$

8,0 Вт/м²·К. Определить температуры на внутренней и внешней поверхностях стенки трубы и изоляции.

Задание 2.4⁽¹⁻³³⁾ Найти поверхность нагрева секционного водоподогревателя тепловой производительностью $Q=1,5 \cdot 10^6$ Вт при условии, что средняя температура греющей воды $t_1=115^\circ\text{C}$, средняя температура нагреваемой воды $t_2=77^\circ\text{C}$. Нагреватели выполнены из латунных трубок $d_1/d_2=14/16$ мм ($\lambda_1=120$ Вт/м·К). На внутренней поверхности трубок имеется слой накипи $\delta_n=0,2$ мм ($\lambda_n=2,0$ Вт/м·К). Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке $\alpha_1=10000,0$ Вт/м²·К, от стенки к нагреваемой воде $\alpha_2=4000,0$ Вт/м²·К. Так как отношение $d_2/d_1=16/14$ мм < 2 то расчет произвести по формуле для плоской стенки.

2.6. Варианты решения задачи теплопередачи через цилиндрическую стенку

Задание 2.5. Определить потерю тепла с 1 пог. м. трубопровода $d_1/d_2=(\lambda_1=50$ Вт/м·К), проложенного на открытом воздухе, если внутри протекает вода со средней температурой $t_1=^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $t_2=^\circ\text{C}$ при условии, что он покрыт изнутри накипью (δ_n , мм; $\lambda_n=$ Вт/м·К) теплоизоляцией ($\delta_{из}$, мм; $\lambda_{из}=$ Вт/м·К.) Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы $\alpha_1=$ Вт/м²·К, от изоляции к окружающему воздуху $\alpha_2=$ Вт/м²·К. Определить температуры на внутренней и внешней поверхностях стенки трубы и изоляции. Варианты представлены в табл.2.2

Таблица 2.2

Варианты задания 2.5

Вариант	d_1/d_2 , мм/мм	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	δ_n , мм	λ_n , Вт/м·К	$\delta_{из}$, мм	$\lambda_{из}$, Вт/м·К	α_1 , Вт/м ² ·К	α_2 , Вт/м ² ·К
1	120/140	90	-30	0,1	2,5	30	0,07	1200	20
2	130/150	85	-20	0,15	2,0	50	0,09	1400	12
3	140/165	80	-15	0,2	3,5	60	0,1	1100	14
4	155/180	75	-10	0,25	3	40	0,08	1350	8
5	180/200	70	0	0,2	2,5	35	0,09	1200	16

Продолжение табл.2.2

Вариант	d_1/d_2 , мм/мм	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	δ_n , мм	λ_n , Вт/м·К	δ_n , мм	λ_n , Вт/м·К	$\alpha_{1,2}$, Вт/м ² ·К	$\alpha_{2,2}$, Вт/м ² ·К
6	140/170	90	10	0,1	2,0	45	0,12	1450	18
7	140/180	85	15	0,15	3,5	55	0,065	1150	10
8	150/180	80	10	0,2	3	60	0,07	1300	12
9	160/190	75	-25	0,1	2,5	45	0,07	1200	20
10	160/200	70	-15	0,15	2,0	35	0,09	1400	12
11	120/140	90	-10	0,2	3,5	60	0,1	1100	14
12	130/150	85	-5	0,25	3	30	0,08	1350	8
13	140/165	80	-30	0,2	2,5	50	0,09	1200	16
14	155/180	75	-20	0,1	2,0	60	0,12	1450	18
15	180/200	70	-15	0,15	3,5	40	0,065	1150	10
16	140/170	90	-10	0,2	3	35	0,07	1300	12
17	140/180	85	0	0,1	2,0	45	0,07	1200	20
18	150/180	80	10	0,15	3,5	55	0,09	1400	12
19	160/190	75	15	0,2	3	60	0,1	1100	14
20	160/200	70	10	0,25	2,5	45	0,08	1350	8
21	120/140	90	-25	0,2	2,0	35	0,09	1200	16
22	130/150	85	-15	0,1	3,5	60	0,12	1450	18
23	140/165	80	-10	0,15	3	30	0,065	1150	10
24	155/180	75	-5	0,2	2,0	50	0,07	1300	12

Продолжение табл.2.2

Вариант	d_1/d_2 , мм/мм	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	δ_n , мм	λ_n , Вт/м·К	δ_n , мм	λ_n , Вт/м·К	$\alpha_{1,2}$, Вт/м ² ·К	$\alpha_{2,2}$, Вт/м ² ·К
25	180/200	70	-30	0,1	3,5	60	0,07	1200	20
26	140/170	90	-20	0,15	3	40	0,09	1400	12
27	140/180	85	-15	0,2	2,5	35	0,1	1100	14
28	150/180	80	-10	0,25	2,0	45	0,08	1350	8
29	160/190	75	0	0,2	3,5	55	0,09	1200	16
30	160/200	70	10	0,1	3	60	0,12	1450	18
31	120/140	90	15	0,15	2,0	45	0,065	1150	10
32	130/150	85	10	0,2	3,5	35	0,07	1300	12
33	140/165	80	-25	0,1	3	60	0,07	1200	20
34	155/180	75	-15	0,15	2,5	30	0,09	1400	12
35	180/200	70	-10	0,2	2,0	50	0,1	1100	14
36	140/170	75	-5	0,25	3,5	60	0,08	1350	8
37	140/180	70	-30	0,2	3	40	0,09	1200	16
38	150/180	90	-20	0,1	2,0	35	0,12	1450	18
39	160/190	85	-15	0,15	3,5	45	0,065	1150	10
40	160/200	80	-10	0,2	3	55	0,07	1300	12
41	120/140	75	0	0,1	2,5	60	0,07	1200	20
42	130/150	70	10	0,15	2,0	45	0,09	1400	12
43	140/165	75	15	0,2	3,5	35	0,1	1100	14

Окончание табл.2.2

Вариант	d_1/d_2 , мм/ мм	t_1 , °C	t_2 , °C	δ_n , мм	λ_n , Вт/м·К	δ_n , мм	λ_n , Вт/м·К	$\alpha_{1,2}$, Вт/м ² ·К	$\alpha_{2,2}$, Вт/м ² ·К
44	155/ 180	70	10	0,25	3	60	0,08	1350	8
45	180/ 200	90	-25	0,2	2,0	30	0,09	1200	16
46	140/ 170	85	-15	0,1	3,5	50	0,12	1450	18
47	140/ 180	80	-10	0,15	3	60	0,065	1150	10
48	160/ 190	75	-5	0,2	2,5	40	0,07	1300	12
49	160/ 200	70	-30	0,1	2,0	35	0,07	1200	20
50	120/ 140	75	-20	0,15	3,5	45	0,09	1400	12
51	130/ 150	70	-15	0,2	3	55	0,1	1100	14
52	140/ 165	90	-25	0,25	2,0	60	0,08	1350	8
53	155/ 180	85	-15	0,2	3,5	45	0,09	1200	16
54	180/ 200	80	-10	0,1	3	35	0,12	1450	18
55	140/ 170	75	-5	0,15	2,5	60	0,065	1150	10
56	140/ 180	70	-30	0,2	2,0	30	0,07	1300	12
57	150/ 180	75	-20	0,1	3,5	50	0,07	1200	20
58	160/ 190	70	-15	0,15	3	60	0,09	1400	12
59	160/ 200	90	-10	0,2	2,0	40	0,1	1100	14
60	120/ 140	85	0	0,25	3,5	35	0,08	1350	8

2.7. Лучистый теплообмен

При высоких температурах в промышленных установках (стекловаренные печи, туннельные камеры обжига керамики), где имеются большие пламенные пространства, лучистый теплообмен по своей интенсивности превосходит другие виды теплообмена. Спектр теплового излучения охватывает диапазон длин волн λ от 0,4 до 0,8 мкм (световые лучи) и от 0,8 мкм до 800 мкм (инфракрасные лучи). Все законы оптики распространяются как на световые, так и на инфракрасные волны. Единицей измерения лучистой энергии служит джоуль. Количество энергии, излучаемой единицей поверхности тела в единицу времени, называется плотностью излучения - E (Вт/м²). Лучистый поток $Q = ES$ - общее количество энергии, излучаемое телом в единицу времени. Часть лучистого потока отражается Q_R , часть потока Q_A - поглощается часть лучистого потока Q_D проходит сквозь тело. Общий поток равен $Q = Q_R + Q_A + Q_D$. Если обозначить $Q_R/Q = R$, $Q_A/Q = A$, $Q_D/Q = D$, то $A + D + R = 1$

Величины R , A , D носят соответственно названия коэффициентов отражения, поглощения, пропускания. При $R=1$ вся энергия отражается - *тело абсолютно белое*. При $A=1$ все лучи поглощаются - *тело абсолютно черное*. При $D=1$ - все лучи проходят, *тело абсолютно прозрачное (диатермичное)*. Полированная поверхность металлов имеет $R=0,97$, нефтяная сажа, снег, бархат, лед имеют $A=0,95-0,97$, двухатомные газы: кислород, водород, азот имеют $D=1$. Многие тела диатермичны для определенной длины волны: кварцевое стекло для ультрафиолета и световых волн, но не прозрачно для инфракрасных; оконное стекло пропускает световые лучи, но малопрозрачно для ультрафиолета и инфракрасных лучей. Для тепловых лучей твердые тела и жидкости непрозрачны, поглощение лучистой энергии заканчивается на глубине менее 0,01 мм. Если тело поглощает лучи любых длин волн при любых температурах, оно называется *серым*, в противном случае - *цветным*. Реальные тела приближенно считают серыми. У металлов коэффициент поглощения с ростом температур растет, у неметаллов - снижается. Для тепловых лучей главное значение имеет состояние поверхности - белая поверхность хорошо отражает лишь световые лучи, но при одинаковом состоянии поверхности также хорошо поглощает тепловые лучи, как и темная. Поверхность называется зеркальной, если она отражает падающий луч под определенным углом, и матовой

- если лучи отражаются по всем направлениям. Связь между излучающей и поглощающей способностями тела устанавливается законом Кирхгофа: наибольшее количество энергии излучается абсолютно черным телом, количество энергии, излучаемое единицей поверхности любого другого тела, пропорционально коэффициенту его поглощения.

Для вывода уравнения Кирхгофа берут две параллельных поверхности: одна серая, другая - абсолютно черная. Серая, соответственно с температурой T , поверхностной плотностью излучения E и коэффициентом поглощения A , а абсолютно черная - $T_0, E_0, A_0=1$. При $T=T_0$ поток и расход лучистой энергии должны быть одинаковы, т.е. $E=AE_0$, то $E/E_0=A=a$ - **степень черноты (закон Кирхгофа.)**

Степень черноты тела равна коэффициенту его поглощения. Для абсолютно черного $a=1$, для абсолютно белого $a=0$, для серого $0 < a < 1$.

Зависимость интенсивности излучения черного тела от длины волны устанавливается законом Планка. $I_{0\lambda} = C_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$ Вт/м³ [2.24] $C_1=3,7 \cdot 10^{-16}$

Вт/м²; $C_2=0,0144$ м.К.

Вычисления по уравнению [2.24] подтверждаются экспериментально: с ростом длины волны интенсивность излучения возрастает от 0 до максимума, а затем снова падает до нуля при $\lambda=\infty$ Длина волны, на которую

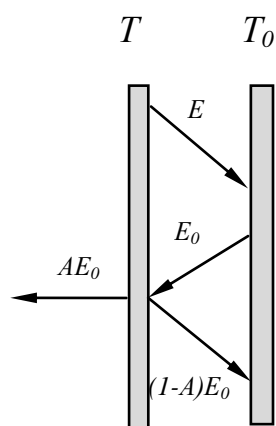


Рис.2.3. Схема передачи тепла излучением

приходится максимальная интенсивность излучения $\lambda_0 = (2898/T)10^{-6}$ [2.25] - закон смещения Вина, полное количество энергии, излучаемой абсолютно черным телом $E_0 = \sigma_0 T^4$ [2.26], $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К)- константа излучения абсолютно черного тела. [2.26] - закон Стефана Больцмана. Для практических расчетов уравнение [2.26] удобнее использовать в виде $E_0 = c_0 (T/100)^4$ $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴)- коэффициент излучения абсолютно черного тела. Степень черноты некоторых твердых тел представлена в табл. 2.3

Таблица 2.3

Степень черноты твердых тел

Материал	t ⁰ С	a	Материал	t ⁰ С	a
Кирпич красный	25-300	0,9	Лак белый	20-100	0,8-0,9

Продолжение табл. 2.3

Материал	t ⁰ С	a	Материал	t ⁰ С	a
Кирпич огнеупорный	1000	0,75-0,85	Лак черный	20-100	0,9-0,95
Асбест	20-300	0,9-0,95	Алюминий шероховатый	26	0,055
Гипс	20	0,9	Медь полированная	80-115	0,02

Для газов в расчетах принимают $E_{\Gamma} = a_{\Gamma} c_0 (T/100)^4$, где a_{Γ} - степень черноты, или относительная излучающая способность газов

Теплообмен между телами в общем виде рассматривается для случаев: 1- тела имеют форму пластин; 2- расположение поверхностей тел концентрическое

При решении задачи передачи лучистой энергии от первого ко второму телу по закону Стефана-Больцмана получим:

$$Q_{1-2} = \frac{a_1 a_2 c_0}{a_1 + a_2 - a_1 a_2} s [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad [2.27] \quad \text{приведенный ко-}$$

эффициент излучения определится из формулы

$$c_{1-2} = \frac{1}{1/c_1 + 1/c_2 - 1/c_0} \quad [2.28], \text{ т.е если одно из тел белое, то теплообмена}$$

нет; если черное, то $c_{1-2} = c_1$ или c_2 ; $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$

При теплообмене в замкнутом пространстве $Q_{1-2} = Q_1 - \varphi Q_2$, где φ - доля энергии Q_2 , попадающая на внутреннее тело. Или $Q_{1-2} =$

$$c_{1-2} S [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad [2.29], \text{ приведенный коэффициент } c_{1-2} =$$

$$\frac{1}{1/c_1 + S_1/S_2 (1/c_2 - 1/c_0)} \quad [2.30], \text{ где } S_1 - \text{поверхность}$$

внутреннего первого тела; S_2 - поверхность внешнего второго тела.

При приближенных практических расчетах замкнутого пространства произвольной формы $Q_{1-2} = c_{1-2} H_{\Gamma} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad [2.31]$, где H_{Γ} представляет собой эффективную или лучевоспринимающую поверхность Зна-

чение ее зависит от формы и расположения тел и она всегда меньше площади поверхностей тел S_1, S_2 . отношение $H_{л} / S_1 = \psi_{1-2}$ называется угловым коэффициентом, или коэффициентом облученности второго тела от первого. Величины $H_{л}, \psi_{1-2}$ рассчитывают заранее и приводят в таблицах.

Для расчета лучистого теплообмена между газом (первое тело) и стенкой (второе тело) применяют формулу Михеева

$$q_{1-2} = a'_{cm} a'_2 c_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad [2.32],$$

где при $a_{cm} = 0,8 \div 1,0$ $a'_{cm} = 0,5 (a_{cm} + 1)$. $a'_2 = \frac{a_2 - A_2 (T_{cm} / T_2)}{1 - (T_{cm} / T_u)}$ [2.33]

При сложном теплообмене, когда наблюдаются случаи конвективного теплообмена и лучеиспускания (топочные устройства, стекловаренные печи, камеры обжига керамики при использовании горящих газов) общее количество переданной теплоты

$$q_{1-2} = q_k + q_l = \alpha_k (T - T_{cm}) + c_{1-2} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad [2.34],$$

где α_k - коэффициент теплоотдачи конвекцией; T - температура жидкости или газа; T_{cm} - температура тепловоспринимающей стенки; c_{1-2} - приведенный коэффициент излучения. Для удобства расчетов применяют формулу

$$q_{1-2} = \alpha_k (T - T_{cm}) + \alpha_l (T - T_{cm}) \quad [2.35],$$

где $\alpha_l = \frac{c_{1-2} [(T/100)^4 - (T_{cm}/100)^4]}{T - T_{cm}}$ [2.36], сумма $\alpha_k + \alpha_l = \alpha$ называется эф-

фективным коэффициентом теплоотдачи, который в очень сильной степени зависит от температуры. Например, для случая теплообмена с воздухом при естественной конвекции $t_{ст}=0$; $c_{1-2} = 4,7$ Вт/(м²·К); $Cr \bullet Pr = 10^8 \div 10^{12}$. При $t=150^0\text{C}$, $\alpha_k = \alpha_l = 8,3$ Вт/(м²·К). При $t=500^0\text{C}$, $\alpha_k < \alpha_l$ в 4 раза. При $t=1000^0\text{C}$, $\alpha_k < \alpha_l$ в 20 раз.

Потери тепла через кладку в окружающую среду через кладку стен и свода определяют по зонам, на которые разделено рабочее пространство печи.

Для стен и свода печей непрерывного действия, работающих постоянными температурами в отдельно взятой зоне, тепловой поток через поверхность кладки F (м²) в окружающую среду определяется по формуле

$$Q = \frac{3,6 \cdot (t_{\text{газ}} - t_{\text{воз}}) \cdot F}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{кДжс / ч [2.37]},$$

или по формуле
$$Q = \frac{0,001(t_{\text{газ}} - t_{\text{воз}}) \cdot F}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{кВт [2.38]},$$

где $(t_{\text{газ}} - t_{\text{воз}})$ — разность температур газов рабочего пространства печи и окружающего воздуха, град;

α_1 — коэффициент теплоотдачи от печных газов (греющей среды) к стенкам внутри рабочего пространства:

при невысокой температуре (сухих газов) $\alpha_1 = 7—14$ Вт/(м²·К);

для смеси воздуха с водяным паром $\alpha_1 = 20—200$ Вт/(м²·К);

для печных газов $\alpha_1 = 100—450$ Вт/(м²·К);

для насыщенного водяного пара без примеси воздуха $\alpha_1 = 9000—12\,000$ Вт/(м²·К).

Для высокотемпературных пламенных печей расчетом определяется температура внутренней поверхности стенки t_1 и тепловой поток;

$\sum \frac{\delta}{\lambda}$ — сумма тепловых сопротивлений отдельных слоев кладки;

δ — толщина слоя, м; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

α_2 — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенок в окружающую среду (рис. 2.2).

$$\alpha_2 = \alpha_{\text{кон}} + \alpha_{\text{л}}; \quad \alpha_2 = K^4 \sqrt{t_n - t_{\text{воз}}} + \frac{5,7\varepsilon \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{воз}}}{100} \right)^4 \right]}{t_n - t_{\text{воз}}} \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К) [2.39]},$$

где $K = 1,6$ — для горизонтальных поверхностей при теплоотдаче вниз (под печи, наружная поверхность пода)

$K = 2,6$ — для вертикальных стенок (наружные поверхности стены стекловаренного и пламенного пространства);

$K = 3,3$ — для горизонтальных поверхностей при теплоотдаче вверх (наружная поверхность свода печи)

ε — степень черноты: для кирпичных стенок $\varepsilon = 0,8—0,9$; для стального каркаса или листа $\varepsilon = 0,8$; при покрытии поверхности светлой алюминиевой краской $\varepsilon = 0,2$;

$t_n, t_{\text{воз}}$ — соответственно температуры наружной поверхности стены и окружающего воздуха.

Коэффициент α_2 можно определить по номограмме (рис.2.4) либо по упрощенной формуле температуры стены $t_n=100—400^\circ$

$$\alpha_2 = (9,5 + 0,07 t_n) \cdot (1 + 0,2v) \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \quad [2.40],$$

где v — скорость ветра для поверхностей на открытом воздухе, м/с. Для средних температур $1000—1500^\circ$ туннельной печи температура наружной поверхности стенок находится в пределах $60—100^\circ\text{C}$. коэффициент $\alpha_2 = 12—15 \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К)}$, а $1/\alpha_2 = 0,07$.

Температура внутренней поверхности стен печей t_l может быть приближенно определена по температурному графику обжига материала (изделий) для различных зон (участков) печи.

При известной температуре t_l потери тепла через кладку печей можно определить по формуле [2.41],

$$Q = \frac{0,001(t_l - t_{\text{воз}}) \cdot F}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + 0,07} \text{ кВт} \quad [2.41],$$

Поверхность кладки F находится как средняя геометрическая от внутренней $F_{\text{вн}}$ и наружной F_n поверхностей

$$F = \sqrt{F_{\text{вн}} F_n}, \text{ м}^2 \quad [2.42],$$

Для печей больших размеров поверхность F считается по наружным размерам.

Потери тепла в окружающую среду не должны превышать

$$q \leq 0,59 (t_{\text{пр}} + 100) \text{ Вт/м}^2 \quad [2.43],$$

где $t_{\text{пр}}$ — средняя температура рабочего пространства печи град.

Максимально допустимый коэффициент теплопередачи через стенку

$$K \leq (59 / t_{\text{пр}}) + 0,59 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \quad [2.44],$$

Потери тепла теплопроводностью через стены печей можно определить с помощью графика, изображенного на рис. 2.5, который рассчитан для температуры окружающего воздуха $t_{\text{возд}} = 15^\circ$, потери тепла от стены в окружающую среду — по формуле [2.39] для вертикальной стенки.