

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Металлургические технологии»

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА
И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Практикум

для студентов специальности 1-42 01 01

«Металлургическое производство и материалобработка»

*Рекомендован учебно-методическим объединением
в сфере высшего образования Республики Беларусь по образованию
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2014

УДК 669.041
ББК 31.391я73
М54

Составители:

*И. А. Трусова, П. Э. Ратников,
Д. В. Менделев, С. М. Кабишов*

Рецензенты:

А. И. Михлюк, А. В. Толстой

Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика : практикум М54 для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка» / сост.: И. А. Трусова [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – 52 с.

ISBN 978-985-550-358-4.

Практикум предназначен для закрепления теоретических знаний, полученных при изучении одноименной дисциплины, а также для приобретения практических навыков по расчету процессов, протекающих в металлургических агрегатах.

УДК 669.041
ББК 31.391я73

ISBN 978-985-550-358-4

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Тема 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ	5
Тема 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТЕНКЕ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ	11
Тема 3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ	16
Тема 4. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ В ПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ.....	20
Тема 5. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ В ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СРЕДЕ.....	26
Тема 6. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН	31
Тема 7. ТЕПЛООБМЕН СОВМЕСТНО ИЗЛУЧЕНИЕМ, КОНВЕКЦИЕЙ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ	43
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	46

ВВЕДЕНИЕ

Современный печной агрегат – это высокомеханизованное и автоматизированное устройство, обеспечивающее максимально заданную производительность и потребление минимального количества тепловой или электрической энергии при достижении необходимого качества технологического продукта.

Несмотря на многообразие металлургических печей различного конструктивного оформления и технологического назначения, в основе их теплового и конструктивного расчета лежат общие подходы и принципы энергетической и гидравлической теории печей.

Изучение дисциплины «Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика» проводится в течение трех семестров и включает выполнение курсового проекта.

Приобретение практических навыков решения задач в области теории теплообмена позволит студентам закрепить знания в области эксплуатации металлургических печей, более полно усвоить основные положения теплотехники и теплоэнергетики, использовать полученные навыки при выполнении курсового проекта.

Практикум включает задачи по основным разделам, изучаемым в рамках дисциплины «Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика».

В теоретической части к рассматриваемым темам приведены основные понятия, законы теплообмена и формулы для выполнения расчетов.

Решение задач выполняется каждым студентом индивидуально, в соответствии с номером варианта, выданного преподавателем.

Тема 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Распределение температуры в различных точках пространства называется полем температур или температурным полем. В общем случае температура является функцией координат и времени:

$$t = f(x, y, z, \tau).$$

Если температурное поле с течением времени не изменяется, то его называют стационарным $t = f(x, y, z)$. Следствием стационарности температурного поля является равенство тепловых потоков, вошедших в стенку и вышедших из нее.

Количественной характеристикой изменения температурного поля в пространстве служит температурный градиент (К/м):

$$\text{grad}t = \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z}.$$

В случае стационарного температурного поля в плоской стенке температурный градиент можно заменить разностью

$$\text{grad}t = \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\Delta t}{\Delta x}.$$

Процесс переноса теплоты теплопроводностью описывается основным законом теплопроводности или **законом Фурье**

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t$$

или

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}.$$

Для стационарного одномерного температурного поля это уравнение можно преобразовать к виду

$$q = -\lambda \frac{\Delta t}{\Delta x}.$$

В случае теплопередачи через многослойную плоскую стену тепловой поток

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} (t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}),$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи от газов к внутренней поверхности стенки и от наружной стенки к воздуху соответственно, Вт/(м²·град).

Задачи

Задача 1. Плотность теплового потока через плоскую стенку толщиной δ (мм) составляет q , (Вт/м²).

Определить разность температур на поверхностях стенки и градиент температуры в стенке, если она выполнена из материала, теплопроводность которого составляет λ (Вт/(м·град)).

Задача 2. Определить коэффициент теплопроводности материала стенки, если при толщине ее δ (мм) и разности температур на поверхностях Δt (град) плотность теплового потока равна q , (Вт/м²).

Задача 3. Плоская стенка выполнена из шамотного кирпича толщиной δ (мм). Температуры ее поверхностей равны соответственно t_{c1} (°C) и t_{c2} (°C). Коэффициент теплопроводности шамотного кирпича зависит от температуры и определяется зависимостью $\lambda = \lambda_0 \left(1 + \beta_\lambda \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2} \right) = 0,838 (1 + 0,0007t)$, Вт/(м·град).

Вычислить и изобразить в масштабе распределение температуры в стенке.

Задача 4. Обмуровка печи состоит из слоев шамотного и красного кирпичей, между которыми расположена засыпка. Толщина шамотного слоя δ_1 (мм), засыпки δ_2 (мм) и красного кирпича δ (мм). Коэффициенты теплопроводности материалов соответственно равны: λ_1 , λ_2 и λ_3 (Вт/(м·град)).

Какой толщины следует сделать слой из красного кирпича, если отказаться от применения засыпки из диатомита, чтобы тепловой поток через обмуровку остался неизменным?

Задача 5. Стены сушильной камеры выполнены из слоя красного кирпича толщиной δ_1 (мм) и слоя строительного войлока. Температуры на внешней поверхности кирпичного слоя t_{c1} (°C) и на внешней поверхности войлока t_{c3} (°C). Коэффициенты теплопроводности красного кирпича и строительного войлока λ_1 и λ_2 , соответственно (Вт/(м·град)).

Вычислить температуру в плоскости соприкосновения слоев и найти толщину войлочного слоя при условии, чтобы тепловые потери через 1 м^2 стенки камеры не превышали q , Вт/м².

Задача 6. Вычислить потери тепла через единицу поверхности обмуровки тепловой установки и температуры на поверхностях обмуровки (внутренней и наружной). Толщина стенки δ (мм), температура газов t_g (°C), температура воздуха t_b (°C). Коэффициент теплоотдачи от газов к внутренней поверхности стенки α_1 (Вт/(м²·град)), от наружной стенки к воздуху α_2 (Вт/(м²·град)). Коэффициент теплопроводности стенки λ (Вт/(м·град)).

Задача 7. Паропровод диаметром $d_1/d_2 = 160/170$ мм покрыт слоем изоляции толщиной δ (мм) с коэффициентом теплопроводности, зависящим от температуры следующим образом: $\lambda_{из} = 0,062 (1 + 0,363 \cdot 10^{-2} t)$, Вт/(м·град).

Определить потери теплоты с 1 пог. м паропровода и температуру на внутренней поверхности трубопровода, если температура наружной поверхности трубы t_{c2} ($^{\circ}\text{C}$), а температура внешней поверхности изоляции не должна превышать 50°C .

Исходные данные для расчета

Задача 1

Вариант	Толщина δ , мм	q , Вт/м ²	λ , Вт/(м·град)
1	50	70	70 (латунь)
2	50	70	0,7 (кирпич)
3	50	70	0,07 (пробка)
4	40	90	70 (латунь)
5	45	100	0,7 (кирпич)
6	35	50	0,07 (пробка)
7	70	80	70 (латунь)
8	60	70	0,7 (кирпич)
9	50	110	0,07 (пробка)
10	100	120	70 (латунь)

Задача 2

Вариант	Толщина δ , мм	Δt , град	q , Вт/м ²
1	2	3	4
1	40	20	145
2	50	35	110
3	100	15	150
4	30	90	200
5	45	50	100
6	100	150	300
7	120	100	400
8	130	90	180
9	200	40	150
10	300	20	400

Задача 3

Вариант	Толщина δ , мм	t_{c1} , °C	t_{c2} , °C
1	250	1350	50
2	500	1350	50
3	500	1250	50
4	250	1200	60
5	250	1200	70
6	250	1100	60
7	250	1000	40
8	500	1000	40
9	500	1000	60
10	250	900	35

Задача 4

Вариант	δ_1 , мм	δ_2 , мм	δ_3 , мм	λ_1 , Вт/(м·°C)	λ_2 , Вт/(м·°C)	λ_3 , Вт/(м·°C)
1	120	50	250	0,93	0,14	0,7
2	150	70	250	0,93	0,14	0,7
3	120	30	250	0,93	0,2	0,7
4	120	60	250	0,93	0,2	0,7
5	240	200	500	0,93	0,15	0,7
6	120	100	250	0,93	0,2	0,7
7	240	70	250	0,93	0,15	0,7
8	120	80	500	0,93	0,14	0,7
9	150	80	500	0,93	0,15	0,7
10	240	40	500	0,93	0,14	0,7

Задача 5

Вариант	$\delta_1,$ мм	$t_{c1},$ °C	$t_{c13},$ °C	$\lambda_1,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_2,$ Вт/(м·°C)	$q,$ Вт/м ²
1	250	110	25	0,7	0,0465	110
2	500	120	20	0,7	0,0465	230
3	500	130	23	0,7	0,0465	340
4	250	140	25	0,7	0,0465	150
5	500	150	30	0,7	0,0465	300
6	250	140	30	0,7	0,0465	180
7	250	200	23	0,7	0,0465	200
8	500	250	30	0,7	0,0465	250
9	250	300	28	0,7	0,0465	300
10	500	180	30	0,7	0,0465	580

Задача 6

Вариант	$\delta,$ мм	$t_r,$ °C	$t_b,$ °C	α_1	α_2	λ
1	2	3	4	5	6	7
1	250	700	20	20	10	0,7
2	500	750	22	22	11	0,7
3	250	800	24	24	12	0,7
1	2	3	4	5	6	7
4	500	850	25	26	13	0,7
5	250	900	27	28	14	0,7
6	500	950	30	30	15	0,7
7	250	1000	20	20	16	0,7
8	500	1050	22	20	15	0,7
9	250	1100	25	22	15	0,7
10	500	1200	30	20	10	0,7

Задача 7

Вариант	δ , мм	$T_{с2}$, °С	$T_{внеш}$, °С
1	80	250	40
2	90	260	45
3	100	270	50
4	110	280	40
5	120	290	45
6	80	300	50
7	90	250	40
8	100	260	45
9	110	270	50
10	120	280	45

Тема 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТЕНКЕ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Если плотность теплового потока, проходящего через плоскую стенку при стационарном режиме, постоянна вдоль оси x , то в случае цилиндрической стенки плотность уменьшается по мере удаления от оси цилиндра, однако общий тепловой поток остается неизменным. Температурный градиент убывает от внутренней поверхности к наружной. Поэтому, говоря о плотности теплового потока через цилиндрическую стенку, всегда следует указывать, к какой поверхности поток отнесен.

Для любой цилиндрической поверхности внутри стенки с текущим радиусом r плотность теплового потока

$$q = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{r \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

откуда тепловой поток, проходящий через трубу длиной L , является постоянным по толщине и равен:

$$Q = 2\pi r L q = \frac{2\pi\lambda L(t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\pi L(t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

Тепловой поток, проходящий через цилиндрическую стенку единичной длины, называется линейной плотностью теплового потока:

$$Q_L = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{R_{L\text{вн}}},$$

где $R_{L\text{вн}} = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}$ – внутреннее линейное тепловое сопротивление цилиндрической стенки;

r_2 и r_1 – соответственно наружный и внутренний диаметры. Для многослойной стенки будем иметь

$$Q = \frac{\pi L(t_1 - t_n)}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}.$$

В случае теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку линейная плотность теплового потока определяется

$$Q_L = \frac{1}{\frac{1}{2r_1\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{2r_{i+1}\alpha_2}} \pi(t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}).$$

Задачи

Задача 1. Змеевики перегревателя выполнены из труб жароупорной стали диаметром d_1/d_2 (мм) с коэффициентом теплопроводности λ , Вт/(м·град). Температура внешней поверхности трубы t_{c2} (°C) и внутренней поверхности t_{c1} (°C).

Вычислить удельный тепловой поток через стенку на единицу трубы.

Задача 2. Стальная труба диаметром d_1/d_2 (мм) с коэффициентом теплопроводности λ , Вт/(м·град) покрыта изоляцией в два слоя одинаковой толщины $\delta_2 = \delta_3$, мм. Температуры внутренней поверхности трубы t_{c1} , °C и наружной поверхности трубы t_{c4} , °C.

Определить потери теплоты через изоляцию с 1 пог. м трубы и температуру на границе соприкосновения слоев изоляции, если первый слой изоляции, накладываемый на поверхность трубы, выполнен из материала с коэффициентом теплопроводности λ_2 , Вт/(м·град), а второй слой – из материала с коэффициентом теплопроводности λ_3 , Вт/(м·град).

Задача 3. Паропровод диаметром d_1/d_2 (мм) с коэффициентом теплопроводности материала λ , Вт/(м·град), покрыт слоем изоляции толщиной δ (мм) с коэффициентом теплопроводности, зависящим от температуры следующим образом: $\lambda_{из} = 0,062(1 + 0,363 \cdot 10^{-2}t)$, Вт/(м·град).

Определить потери теплоты с 1 пог. м паропровода и температуру на внутренней поверхности трубопровода, если температура наружной поверхности трубы t_{c2} (°C), а температура внешней поверхности изоляции не должна превышать 50 °C.

Задача 4. Вычислить потери теплоты с 1 пог. м неизолированного трубопровода диаметром d_1/d_2 (мм), проложенного на открытом воздухе, если внутри трубы протекает вода со средней температурой $t_{ж1}$, °C. Коэффициент теплопроводности ма-

териала трубы λ , Вт/(м·град). Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы α_1 , Вт/(м²·град) и от трубы к окружающему воздуху α_2 , Вт/(м²·град).

Определить также температуры на внутренней и внешней поверхностях трубы.

Задача 5. Трубчатый воздушный подогреватель выполнен из труб диаметром d_1/d_2 (мм). Коэффициент теплопроводности материала труб λ , Вт/(м·град). Внутри трубы движется горячий газ, а наружная поверхность труб омывается поперечным потоком воздуха. Средняя температура дымовых газов $t_{ж1}$, °С, а средняя температура подогреваемого воздуха $t_{ж2}$, °С. Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке α_1 , Вт/(м²·град) и от стенки к воздуху α_2 , Вт/(м²·град).

Вычислить коэффициент теплопередачи. Расчет произвести по формулам для цилиндрической и плоской стенок.

Исходные данные для расчетов

Задача 1

Вариант	d_1 , мм	d_2 , мм	λ , Вт/(м·К)	t_{c2} , °С	t_{c1} , °С
1	32	42	14	580	450
2	30	38	12	520	410
3	35	48	16	580	420
4	32	42	10	510	410
5	30	40	18	600	400
6	28	32	12	600	480
7	26	30	13	550	420
8	36	46	16	590	430

Задача 2

Вариант	d_1 , мм	d_2 , мм	λ , Вт/(м·К)	δ_2 , мм	t_{c1} , °C	t_{c4} , °C
1	100	110	50	50	250	50
2	120	140	55	40	300	45
3	130	150	57	45	310	57
4	108	116	48	40	320	45
5	100	110	40	40	200	40
6	130	150	47	60	230	40
7	110	130	60	50	300	50
8	120	130	65	50	310	60

Задача 3

Вариант	d_1 , мм	d_2 , мм	δ , мм	t_{c2} , °C
1	160	170	100	300
2	170	180	110	290
3	150	170	120	280
4	160	170	110	290
5	170	190	90	280
6	180	200	100	340
7	150	170	80	350
8	160	170	100	350

Задача 4

Вариант	d_1 , мм	d_2 , мм	$t_{ж1}$, °C	λ	α_1	α_2
1	150	165	90	-15	1000	12
2	160	170	100	-20	1100	15
3	140	160	95	-25	1200	20
4	170	180	93	-18	1100	10
5	180	195	88	-12	900	20
6	200	180	90	-18	980	14
7	150	170	87	-20	1100	12
8	160	175	94	-18	1300	12

Задача 5

Вариант	d_1 , мм	d_2 , мм	λ , Вт/(м·К)	$t_{ж1}$, °С	$t_{ж2}$, °С	α_1 , Вт/(м ² ·К)	α_2 , Вт/(м ² ·К)
1	43	49	50	250	145	45	25
2	50	55	48	270	130	50	30
3	45	52	49	280	150	40	27
4	50	58	50	230	135	38	28
5	45	52	52	310	155	50	22
6	50	56	49	270	120	50	30
7	43	49	46	220	155	55	20
8	50	56	40	300	40	50	20

Тема 3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Нестационарная теплопроводность описывается дифференциальным уравнением теплопроводности $\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$

и основной задачей решения этого уравнения является отыскание нестационарного распределения температур в теле как функции пространственных координат и времени при плавлении, нагреве и охлаждении тел $t = t(x, y, z, \tau)$.

В зависимости от поведения тел при нагреве и охлаждении их разделяют на две категории – термически тонкие и термически массивные тела. Тонкими телами называют такие, при нагреве которых температуру в различных точках по сечению можно принимать одинаковой, т. е. считать, что температура таких тел изменяется только во времени. Массивными считаются такие тела, при нагреве которых температура изменяется как по сечению тела, так и во времени. В отличие от тонких тел, при нагреве массивных тел необходимо учитывать неравномерное температурное поле по сечению. Мерой массивно-

сти тела, позволяющей отнести его к одной из указанных категорий, является критерий или число Био:

$$Bi = \frac{\alpha S}{\lambda},$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

S – характерный размер тела (для пластины – половина ее толщины при симметричном нагреве, т. е. нагреве с двух сторон; для цилиндра и шара – радиус), м.

Если $Bi \leq 0,25$ – тело считается тонким, если $Bi > 0,5$ – массивным. В интервале от 0,25 до 0,50 находится переходная область.

Задачи

Задача 1. Стальную пластину толщиной δ (мм) помещают в печь, нагревая с обеих сторон. Средняя теплоемкость пластины c , кДж/(кг·К), начальная температура $t_{\text{нач}}$ (°С). Температура печи t_c (°С), приведенный коэффициент излучения $\sigma_{\text{пр}}$ (Вт/(м²·К⁴).

Определить температуру пластины через τ (мин) после начала нагрева. В связи с небольшой толщиной и высоким коэффициентом теплопроводности металла перепадом температур по толщине пластины пренебречь. Плотность стали 7800 кг/м³.

Задача 2. Температура стального шара диаметром d (мм) $t_{\text{нач}}$ (°С). Шар погружают в хорошо перемешиваемую жидкость, в результате чего температура его поверхности очень быстро опускается до $t_{\text{пов}}$ (°С). Коэффициент теплопроводности стали λ (Вт/(м·К)), удельная теплоемкость c (кДж/(кг·К)), плотность ρ (кг/м³).

Определить температуру в центре шара через время τ (мин) после начала охлаждения.

Задача 3. Определить время τ , мин, необходимое для нагрева плоской заготовки толщиной δ (мм) с начальной температурой заготовки $t_{\text{нач}}$ ($^{\circ}\text{C}$), которую поместили в печь с температурой $t_{\text{печ}}$ ($^{\circ}\text{C}$). Необходимая температура нагрева поверхности t ($^{\circ}\text{C}$). Коэффициент теплопроводности заготовки λ (Вт/(м·К)), теплоемкость c (кДж/(кг·К)), плотность ρ (кг/м³), коэффициент теплоотдачи к поверхности заготовки α (Вт/(м²·К)).

Задача 4. Длинный стальной вал диаметром d (мм) с начальной температурой $t_{\text{нач}}$ ($^{\circ}\text{C}$) помещен в печь с температурой печи $t_{\text{печ}}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Определить время τ (мин), необходимое для нагрева вала, если по технологическим условиям температура центра должна быть $t_{\text{ц}}$ ($^{\circ}\text{C}$), а также температуру поверхности вала в этот момент. Коэффициент теплопроводности стали λ (Вт/(м·К)), температуропроводности a (м²/ч). Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала α (Вт/(м²·К)).

Исходные данные для расчета

Задача 1

Вариант	δ , мм	c , кДж/(кг·К)	$t_{\text{нач}}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{с}}$, $^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{\text{пр}}$, Вт/(м ² ·К ⁴)	τ , мин
1	20	0,5	20	1000	$3,3 \cdot 10^{-8}$	20
2	18	0,45	25	1050	$3,1 \cdot 10^{-8}$	25
3	22	0,55	30	1100	$3,0 \cdot 10^{-8}$	30
4	16	0,6	18	1150	$2,9 \cdot 10^{-8}$	15
5	20	0,65	24	1200	$2,8 \cdot 10^{-8}$	20
6	18	0,6	26	1250	$2,7 \cdot 10^{-8}$	25
7	22	0,45	28	1300	$3,4 \cdot 10^{-8}$	30
8	16	0,45	50	900	$3,5 \cdot 10^{-8}$	20

Задача 2

Вариант	d , мм	$t_{\text{нач}}$, °С	$t_{\text{пов}}$, °С	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	τ , мин
1	100	400	30	25	800	7800	5
2	120	350	25	28	700	7800	7
3	140	450	35	30	650	7800	10
4	80	380	30	27	600	7800	4
5	150	470	40	42	570	7800	12
6	200	370	30	45	700	7800	14
7	300	250	25	35	750	7800	20
8	250	300	40	28	700	7800	15

Задача 3

Вариант	δ , мм	$t_{\text{нач}}$, °С	$t_{\text{печ}}$, °С	t , °С	λ , Т/(м·К)	c , кДж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	α , Вт/(м ² ·К)
1	100	25	600	450	45,4	0,502	7800	120
2	90	30	650	400	42,0	0,550	7800	100
3	80	30	700	500	51,0	0,560	7800	110
4	110	50	750	450	42,0	0,570	7800	100
5	100	60	800	580	45,0	0,500	7800	90
6	90	20	650	450	50,0	0,600	7800	100
7	80	20	700	500	52,0	0,510	7800	90
8	100	30	800	650	45,0	0,500	7800	110

Задача 4

Вариант	d , мм	$t_{\text{нач}}$, °С	$t_{\text{печ}}$, °С	$t_{\text{ц}}$, °С	λ , Вт/(м·К)	a , м ² /ч	α , Вт/(м ² ·К)
1	120	20	820	800	21	0,022	140
2	140	20	900	850	35	0,026	160
3	160	20	1000	930	29	0,023	150
4	180	20	1100	1050	32	0,023	180
5	200	20	1000	920	30	0,023	150
6	100	30	1100	1000	22	0,022	160
7	110	30	850	800	25	0,023	160
8	150	30	1200	1170	29	0,023	160

Тема 4. ТЕПЛОБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ В ПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ

Передача теплоты излучением осуществляется при помощи электромагнитных волн, распространение которых возможно даже в вакууме. Диапазон длин волн при излучении: от 0,02 мкм до 400 мкм, Излучение свойственно любому телу при условии, что его температура отлична от абсолютного нуля. Чем выше температура тела, тем больше его тепловое излучение.

Тела могут поглощать, пропускать или отражать теплоту. В общем случае твердые тела поглощают лишь часть падающей на них тепловой энергии, часть энергии пропускают через себя и часть отражают. Если на тело падает тепловой поток Q , то имеем

$$Q = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{проп}} + Q_{\text{отр}}$$

или (если разделить на Q)

$$A + D + R = 1,$$

т. е. сумма поглощательной, пропускательной и отражательной способности равна единице.

Для реальных тел характерно частичное поглощение и частичное отражение тепловой лучистой энергии. В теории теплового излучения их называют серыми телами.

Закон Планка. Интенсивность монохроматического (при определенной длине волны) излучения зависит от температуры и длины волны, т. е. $I_{\lambda} = f(T, \lambda)$.

Закон Планка для интенсивности излучения абсолютно черного тела записывается в виде

$$I_{\lambda,0} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{kT}} - 1)^{-1},$$

где h – универсальная постоянная Планка, Дж·с: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$;
 c – скорость света, м/с;
 k – постоянная Больцмана, Дж/К: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$.

Закон Стефана-Больцмана. Для реальных процессов чаще всего определяют полное излучение, т. е. суммарное при всех длинах волн. В этом случае при суммировании значений интенсивности получают выражение

$$q_0 = \sigma_0 T^4,$$

где q_0 – плотность теплового потока абсолютно черного тела, Вт/м²;

σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела: $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Закон Стефана-Больцмана записывают также в виде

$$q_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴).

Поскольку серое излучение характеризуется тем, что его интенсивность составляет некоторую долю от интенсивности излучения абсолютно черного тела, используют понятие степени черноты, т. е. отношение излучательной способности серого тела к излучательной способности черного тела

$$\varepsilon = \frac{q}{q_0}.$$

С учетом этого закон Стефана-Больцмана для серого тела имеет вид

$$q = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon \sigma_0 T^4.$$

Связь между излучательной и поглощательной способностями устанавливает закон Кирхгофа: отношение излучательной способности серого тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел, находящихся при одинаковой температуре, и равно излучательной способности черного тела при той же температуре.

$$\frac{q}{A} = \frac{q_1}{A_1} = \frac{q_2}{A_2} = \dots = q_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Из закона следует, что

$$q = AC_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Поглощательная способность A численно равна степени черноты тела, т. е. степень черноты характеризует как излучательную, так и поглощательную способность.

Значения приведенных коэффициентов излучения для различных геометрических систем.

Для двух близко расположенных бесконечных плоскостей

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}}$$

или

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Для системы из двух концентрических шаровых поверхностей или двух одноосных длинных цилиндров, когда $\varphi_{1,2} = 1$, а $\varphi_{2,1} = F_1 / F_2$, приведенный коэффициент излучения

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)}$$

или

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{F_1}{F_2}}.$$

При наличии n экранов

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{\text{э},i}} + \frac{1}{\varepsilon_2} - (n+1)},$$

где $\varepsilon_{\text{э},i}$ – степень черноты каждого экрана.

Задачи

Задача 1. Внутренняя обмуровка камеры нагревательной установки выполнена из шамотного кирпича, а внешняя обшивка – из листовой стали.

Вычислить потери теплоты в окружающую среду с единицы поверхности в единицу времени в условиях стационарного режима за счет лучистого теплообмена между поверхностями обмуровки и обшивки, которые можно рассматривать как две безграничные параллельные поверхности, разделенные прозрачной средой. Температура внешней поверхности обмуровки t_1 ($^{\circ}\text{C}$), температура стальной обшивки t_2 ($^{\circ}\text{C}$). Степени черноты шамотного кирпича $\varepsilon_{\text{ш}}$, листовой стали $\varepsilon_{\text{ст}}$.

Задача 2. Нагрев стального цилиндра, установленного вертикально, осуществляется в муфельной электрической печи с температурой стенок t_2 ($^{\circ}\text{C}$). Степень черноты стали $\varepsilon_{\text{ст}}$, сте-

пень черноты стенки печи $\varepsilon_{\text{печ}}$. Диаметр цилиндра d (мм), высота – l (мм). Внутренние размеры печи $B \times L \times S$ (мм).

Определить тепловой поток на цилиндр, когда его температура равна t_1 ($^{\circ}\text{C}$).

Задача 3. Между двумя параллельными поверхностями с температурами t_1 ($^{\circ}\text{C}$) и t_2 ($^{\circ}\text{C}$) и степенями черноты ε_1 и ε_2 установлен экран.

Какова должна быть степень черноты экрана, чтобы тепловой поток излучением с одной поверхности на другую не превышал q ($\text{Вт}/\text{м}^2$)?

Задача 4. В стене печи толщиной l (мм) имеется окно размером $a \times b$ (мм). Температура внутри печи $t_{\text{печ}}$ ($^{\circ}\text{C}$), окружающего воздуха $t_{\text{в}}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Определить лучистый поток через окно.

Задача 5. Температура поверхности выходного коллектора пароперегревателя высокого давления t_1 ($^{\circ}\text{C}$).

Вычислить тепловые потери с 1 м длины неизолированного коллектора путем лучистого теплообмена, если наружный диаметр коллектора $d = 275$ мм, коэффициент поглощения A_c , а температура ограждений t_2 ($^{\circ}\text{C}$).

Исходные данные для расчета

Задача 1

Вариант	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon_{\text{ш}}$	$\varepsilon_{\text{ст}}$
1	127	50	0,8	0,6
2	135	55	0,8	0,6
3	150	60	0,8	0,6
4	250	45	0,8	0,6
5	327	50	0,8	0,6
6	450	55	0,8	0,6
7	500	60	0,8	0,6
8	550	45	0,8	0,6

Задача 2

Вариант	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{\text{ст}}$	$\varepsilon_{\text{печ}}$	$d, \text{мм}$	$l, \text{мм}$	$B \times L \times S, \text{мм}$	$t_1, ^\circ\text{C}$
1	800	0,9	0,8	40	160	250 × 250 × 250	600
2	900	0,85	0,8	50	170	300 × 300 × 300	700
3	1000	0,85	0,8	60	200	400 × 400 × 400	800
4	1100	0,9	0,8	60	250	450 × 450 × 450	900
5	1000	0,85	0,8	60	160	400 × 400 × 400	850
6	1000	0,9	0,8	45	180	300 × 300 × 300	870
7	950	0,85	0,8	50	180	400 × 400 × 400	800
8	1050	0,9	0,8	40	180	300 × 300 × 300	880

Задача 3

Вариант	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	ε_1	ε_2	$q, \text{Вт/м}^2$
1	900	300	0,85	0,6	20 900
2	1000	500	0,85	0,6	17 200
3	1100	800	0,85	0,6	11 600
4	800	300	0,85	0,6	18 600
5	900	500	0,85	0,6	26 000
6	800	400	0,85	0,6	4500
7	850	650	0,85	0,6	8400
8	1000	900	0,85	0,6	10 000

Задача 4

Вариант	$l, \text{мм}$	$a, \text{мм}$	$b, \text{мм}$	$t_{\text{печ}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$
1	400	460	520	1000	20
2	450	500	600	900	25
3	500	250	500	850	30
4	400	300	400	800	20
5	450	200	850	750	25
6	500	400	400	700	30
7	400	300	320	650	20
8	500	250	250	600	25

Задача 5

Вариант	$t_1, ^\circ\text{C}$	$d, \text{мм}$	A_c	$t_2, ^\circ\text{C}$
1	500	275	0,8	30
2	600	300	0,8	40
3	700	325	0,75	35
4	800	350	0,7	20
5	850	350	0,8	30
6	450	250	0,7	25
7	550	280	0,65	23
8	660	200	0,7	27

Тема 5. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ В ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СРЕДЕ

В металлургической практике широко распространены такие случаи теплообмена излучением, когда излучающие поверхности разделены ослабляющей средой. Ослабляющей средой могут являться газы, излучающие и поглощающие тепловую энергию, а также газы с взвешенными в них частичками углерода и золы. В объемах, заполненных такой средой, проходящий лучистый поток будет ослабляться, так как частицы среды способны поглощать и рассеивать тепловую энергию.

Закон Бугера-Бера. Согласно закону Бугера относительное ослабление луча в слое среды пропорционально толщине этого слоя dx . Однако согласно закону Бера относительное изменение интенсивности луча в слое данной толщины пропорционально концентрации ослабляющего вещества μ . Отсюда следует объединенный закон Бугера-Бера:

$$\frac{dJ_{\lambda, x}}{J_{\lambda, x}} = -k_{\lambda}\mu dx.$$

Коэффициент пропорциональности k_λ характеризует способность частиц поглощать и рассеивать излучение волн длиной λ и называется спектральным коэффициентом ослабления.

Так как газовые среды практически не отражают падающее на них излучение ($R = 0$), то поглощательная способность равна отношению поглощенного потока к падающему:

$$a_{\lambda, x} = \frac{(J'_{\lambda, x} - J''_{\lambda, x})}{J'_{\lambda, x}};$$
$$a_{\lambda, x} = 1 - e^{-k_\lambda \mu S}.$$

Согласно закону Кирхгофа для равновесной системы спектральные степень черноты и поглощательная способность равны, поэтому можно записать

$$\varepsilon_{\lambda, x} = 1 - e^{-k_\lambda \mu S}.$$

Из этих формул следует, что $a_{\lambda, x}$ и $\varepsilon_{\lambda, x}$ тем больше, чем больше произведение μS .

Для упрощения практических расчетов обычно вводят понятие серый газ, т. е. такой газ, поглощательная способность (следовательно, и ε) которого во всех частях спектра одинакова.

Спектр поглощения газов является селективным. Это означает, что газы поглощают (излучают) тепловую энергию в определенных интервалах длин волн $\Delta\lambda$, определяющих так называемые полосы поглощения. Спектр встречающихся в составе печной атмосферы одно- и двухатомных газов (кислорода, азота, оксида углерода и др.) состоит из очень узких полосок, поэтому общее количество энергии, которое излучают эти газы, очень невелико, и практически можно считать, что они совсем не излучают теплоты. Трехатомные и многоатомные газы, наоборот, могут излучать и поглощать большое количество тепла. Наибольшее и практическое значения имеет излучение диок-

сида углерода (CO_2) и водяных паров (H_2O), поскольку в основном из них (наряду с азотом) состоят дымовые газы.

Поглощение газами тепловой энергии зависит от температуры и концентрации газа, выражаемой его парциальным давлением и эффективной толщиной газового слоя

$$A_{\Gamma} = f(T; pS_{\text{эф}})$$

или

$$\varepsilon_{\Gamma} = f(T; pS_{\text{эф}}).$$

Для практических расчетов теплового излучения газов применяют также закон Стефана-Больцмана, причем степень черноты газа также характеризует его излучательную способность. Количество теплоты, которое излучает газ на 1 м^2 окружающей его поверхности, в единицу времени

$$q = \varepsilon_{\Gamma} C_0 \left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4.$$

Степень черноты газов зависит от температуры газа, его парциального давления и средней длины пути луча. Обычно температура газов известна. Парциальное давление газов можно получить из расчета горения топлива. Так, если в продуктах сгорания содержится 10 % CO_2 и 15 % H_2O , то следовательно, их парциальные давления соответственно равны 0,10 и 0,15 общего давления печной среды, которое равно практически давлению атмосферы.

Среднюю длину луча можно определить по формуле

$$S_{\text{эф}} = \eta \left(\frac{4V}{F} \right),$$

где V – объем, заполненный излучающим газом, м^3 ;

F – поверхность всех стенок, ограничивающих этот объем, м^2 ;

η – коэффициент, обычно принимаемый равным 0,9.

Для определения степени черноты газов пользуются графиками, с помощью которых находят степень черноты $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ и условную степень черноты водяных паров $\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$. Степень черноты водяных паров умножить на поправку, $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}\beta$. Степень черноты газов

$$\varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}\beta.$$

Нагретый газ излучает на 1 м^2 поверхности окружающих его стенок количество теплоты, определяемое по выражению

$$q_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{г}} C_0 \left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4.$$

С единицы поверхности стенок излучается тепловой поток с плотностью

$$q_{\text{ст}} = \varepsilon_{\text{ст}} C_0 \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4.$$

Задачи

Задача 1. В закрытой с обеих сторон трубе диаметром d (мм) и длиной l (мм) находится смесь сухого воздуха и CO_2 при температуре t ($^{\circ}\text{C}$). Парциальное давление CO_2 равно p (Н/м^2).

Определить степень черноты находящейся в трубе смеси газов.

Задача 2. В нагревательной печи средняя по объему температура газов равна t ($^{\circ}\text{C}$). Объем печи V (м^3), полная поверхность ограждения F (м^2). Парциальные давления CO_2 и H_2O равны соответственно p_{CO_2} (кН/м^2) и $p_{\text{H}_2\text{O}}$ (кН/м^2).

Определить степень черноты излучающей газовой смеси и собственное излучение продуктов сгорания.

Задача 3. По трубе рекуператора диаметром d (мм) проходят продукты сгорания, которые содержат CO_2 (%) и H_2O (%) при температуре t ($^\circ\text{C}$). Температура внутренней поверхности трубы $t_{\text{тр}}$ ($^\circ\text{C}$), а степень черноты $\varepsilon_{\text{тр}}$.

Определить плотность лучистого потока от газа к внутренней поверхности трубы. Атмосферное давление принять 100 кПа.

Задача 4. На поду печи, заполненной газом, нагревают металл. Размеры пода $1 \times 1,5$ м. Степень черноты металла $\varepsilon = 0,8$. Высота свода над металлом 0,95 м. Газ содержит 18 % CO_2 и 12 % H_2O , температура газа 1200 $^\circ\text{C}$. Определить плотность лучистого потока от газа и кладки на металл, если температура металла 800 $^\circ\text{C}$.

Исходные данные для расчета

Задача 1

Вариант	d , мм	l , мм	t , $^\circ\text{C}$	p , Н/м ²
1	200	1000	550	9000
2	180	1100	600	8000
3	160	1200	650	7000
4	140	1300	700	7500
5	220	1500	750	8500
6	240	1600	800	9500
7	260	800	850	10000
8	280	900	900	9000

Задача 2

Вариант	t , $^\circ\text{C}$	V , м ³	F , м ²	p_{CO_2} , кН/м ²	$p_{\text{H}_2\text{O}}$, кН/м ²
1	1200	12	28	12	8
2	1100	15	35	11	9
3	1050	45	99	17	10
4	1000	112	210	18	12
5	1300	180	290	13	9
6	1250	45	99	12	8
7	900	324	489,6	11	9
8	850	112	210	13	9

Задача 3

Вариант	d , мм	CO ₂ , %	H ₂ O, %	t , °C	$t_{\text{тр}}$, °C	$\varepsilon_{\text{тр}}$
1	114	18	12	1200	800	0,8
2	116	16	11	1150	750	0,85
3	110	14	10	1100	710	0,75
4	120	12	8	1050	700	0,8
5	114	11	6	1000	650	0,82
6	116	10	4	950	600	0,84
7	110	18	12	900	550	0,8
8	120	16	11	800	500	0,78

Тема 6. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОБМЕН

Процессы конвективного тепло- и массообмена происходят в результате движения газа (жидкости) и всегда тесно связаны с соответствующими процессами теплопроводности и диффузии.

В зависимости от причины, которой обусловлено движение жидкости или газа, различают вынужденную конвекцию и свободную, или естественную. Вынужденная конвекция обусловлена внешними по отношению к рассматриваемому процессу причинами, например, действием вентилятора, насоса, компрессора и т. д. Свободная конвекция обусловлена самим процессом тепло- или массообмена, а именно силами, возникающими вследствие неоднородности поля плотности, что в свою очередь связано с неоднородностью поля температур (при теплообмене) или концентраций (при массообмене).

Плотность теплового потока на поверхности при конвективном теплообмене весьма существенно зависит от скорости и направления движения жидкости или газа, а также от режима давления. Кроме того, плотность теплового потока зависит от температур поверхности и жидкости, от физических свойств жидкости (прежде всего от коэффициента теплопроводности жидкости), от формы и качества поверхности твердого тела.

Для описания процессов конвективной тепло- и массоотдачи используют формулу Ньютона (для теплоотдачи):

$$q = \alpha(t_{\text{ср}} - t_{\text{пов}})$$

и соответствующее выражение для процесса массоотдачи

$$m = \beta(\rho_{\text{ср}} - \rho_{\text{пов}}),$$

где β – коэффициент массоотдачи, м/с;

ρ – парциальная плотность.

В связи с тем, что сложные процессы, какими являются конвективные тепло- и массопередача, описываются простыми формулами, вся сложность этих процессов учитывается коэффициентами теплоотдачи α и массоотдачи β , которые зависят от всех факторов, которые влияют на сами процессы тепло- и массопередачи. Поэтому основная трудность при расчете процессов конвективной тепло- и массопередачи состоит в нахождении коэффициентов α и β . В большинстве случаев значения этих коэффициентов определяют с помощью эмпирических формул, полученных путем обработки экспериментальных данных.

Основные критерии подобия процессов теплообмена

Критерий Фурье $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$ (a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время, с; R – характерный размер, м), является безразмерным временем. Критерий Фурье характеризует связь между скоростью изменения температуры тела, его физическими характеристиками и размерами.

Критерий Пекле $Pe = \frac{wl}{a} = \frac{w\rho c}{\lambda/l}$ (w – скорость движения среды, м/с; l – характерный геометрический размер, м) характе-

ризует соотношение переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью.

Критерий Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \rho c}{\lambda}$ (ν – кинематический коэффициент вязкости, m^2/c ; a – коэффициент температуропроводности, m^2/c) является мерой подобия скоростных и температурных полей.

Критерий Рейнольдса $Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{wd}{\mu/\rho} = \frac{\rho wd}{\mu} = \frac{\rho w^2}{\mu w/d}$ (w – скорость потока газа или жидкости, d – характерный размер потока, м; ν – кинематический коэффициент вязкости, m^2/c ; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с ($N·c/m^2$)) используется в случае вынужденного движения, характеризующий отношение инерционных сил к силам трения.

Критерий Грасгофа $Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t$ (β – коэффициент объемного расширения) используется в случае свободного движения, который характеризует меру отношения подъемной силы к силе вязкого трения.

Критерий Нуссельта $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{\alpha}{\lambda/l}$ (l – характерный размер тела, омываемого потоком) характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем вблизи нагреваемой (охлаждаемой) поверхности, т. е. передачу теплоты от окружающей среды к поверхности материалов.

При конвективной теплоотдаче основной задачей является определение коэффициента теплоотдачи α . Поэтому опытные данные обычно обрабатывают в виде *критериальных уравнений*, а именно:

$$Nu = f(Fo, Re, Pe, Cr) \text{ или } Nu = f(Fo, Re, Pr, Cr) .$$

Теплообмен при вынужденном течении в трубах

Турбулентный режим ($Re > 10\ 000$). При стабилизированном турбулентном течении зависимость коэффициента теплоотдачи от других переменных записывается в виде формулы А. А. Михеева:

$$Nu_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{пов}} \right)^{0,25}.$$

Для газов

$$\left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{пов}} \right)^{0,25} \approx 1.$$

Индекс «пов» («поверхность») означает, что критерий Прандтля берется при температуре стенки, индекс «ж» означает, что физические параметры следует брать при температуре жидкости.

В качестве температуры стенки трубы $t_{пов}$ берут среднеарифметическую температуру на ее концах $t_{пов1}$ и $t_{пов2}$. Среднеобъемная температура жидкости или газа определяется среднеарифметическая температура жидкости на концах трубы.

Ламинарный режим ($Re < 2000$). Для практических расчетов используется формула М. А. Михеева:

$$Nu_{ж} = 0,17 Re_{ж}^{0,33} Pr_{ж}^{0,43} Gr_{ж}^{0,1}. \quad (2)$$

В качестве масштаба температуры, входящего в критерий Грасгофа, взята разность средних температур жидкости и стенки, в качестве линейного масштаба – гидравлический диаметр.

Переходной режим ($2000 > Re > 10\ 000$). Переходной режим характеризуется вихревым движением, которое с увели-

чением критерия Re постепенно переходит в чисто турбулентный режим интенсивным перемешиванием вихрей.

При ориентировочных расчетах можно использовать формулу

$$Nu_{ж} = K Pr_{ж}^{0,43},$$

где K в зависимости от функции Рейнольдса определяется:

$Re_{ж} \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	8,0	9,0	10,0
K	2,2	3,6	4,9	7,5	10,0	12,2	16,5	20,0	27,0	30,0	33,0

Теплообмен при вынужденном течении снаружи труб

Одиночная труба в поперечном потоке. Для расчета среднего по окружности коэффициента теплоотдачи расчетные формулы для случая направления струи под прямым углом имеют вид:

при $Re_{ж} < 10^3$

$$Nu_{ж} = 0,56 Re_{ж}^{0,50} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{пов}} \right)^{0,25};$$

при $Re > 10^3$

$$Nu_{ж} = 0,28 Re_{ж}^{0,60} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{пов}} \right)^{0,25}.$$

В качестве линейного масштаба l следует брать наружный диаметр трубы, в качестве масштаба скорости – скорость жидкости перед трубой. С уменьшением угла атаки среднее значение α резко уменьшается.

Пучки труб в поперечном потоке. Расположение труб в пучке бывает коридорным и шахматным. Условия омывания

первого ряда по ходу жидкости близки к условиям омывания одиночных труб. Для последующих рядов характер омывания изменяется. Дополнительная турбулизация потока приводит к тому, что по мере удаления от первого ряда коэффициент теплоотдачи возрастает. Начиная с третьего ряда, поток стабилизируется, и возрастание коэффициента теплоотдачи прекращается. По абсолютному значению теплоотдача в шахматных пучках выше, чем в коридорных.

Для расчета коэффициента теплоотдачи в стабилизированной части потока, т. е. начиная с третьего ряда труб, α_3 используются формулы А. А. Михеева:

при коридорном расположении труб

$$Nu_{ж} = 0,22 Re_{ж}^{0,65} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{пов}} \right)^{0,25} ;$$

при шахматном расположении труб

$$Nu_{ж} = 0,40 Re_{ж}^{0,60} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{пов}} \right)^{0,25} ;$$

для газов

$$\frac{Pr_{ж}}{Pr_{пов}} \approx 1.$$

В качестве масштаба скорости, входящего в критерий Re, принята среднерасходная скорость в самом узком сечении ряда, в качестве линейного масштаба принят наружный диаметр трубы.

Коэффициенты теплоотдачи для первого ряда (как для коридорных, так и для шахматных пучков) определяются по формуле

$$\alpha_1 = 0,63\alpha_3.$$

Для второго ряда:
для коридорных пучков

$$\alpha_2 = 0,9\alpha_3;$$

для шахматных пучков

$$\alpha_2 = 0,7\alpha_3.$$

Среднее по пучку из n рядов труб в глубину значение коэффициента теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha_{1-n} = \frac{\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_i \sum_{i=3}^n F_i}{\sum_{i=1}^n F_i},$$

где F – поверхность труб в соответствующих рядах.

Продольное обтекание труб. В случае продольного обтекания труб коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле (1), при этом в качестве линейного масштаба принимают гидравлический диаметр канала с размещенными в нем трубами.

При омывании пучка труб поток дополнительно турбулизуется, поэтому значения Нуссельта, полученные по формуле (1), необходимо умножить на поправочный коэффициент

$$k = \left(\frac{s_1 s_2}{d^2} \right)^{0,18}.$$

Свободная конвекция в неограниченном пространстве

Коэффициент теплоотдачи определяют по формуле

$$\text{Nu}_m = C(\text{Cr} \cdot \text{Pr})_m^n.$$

В качестве разности температур при определении критерий Грасгофа берут разность температур поверхности теплообмена и среды на большом удалении от нее: $t_{\text{пов}} - t_{\text{ср}}$. Все физические параметры выбирают при средней температуре $t_m = 0,5(t_{\text{пов}} + t_{\text{ср}})$ либо при температуре жидкости или среды $t_{\text{ср}}$. От выбора определяющей температуры зависят значения C и n :

Gr·Pr	$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2} \dots 2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$
C	1,18	0,54	0,135
n	1/8	1/4	1/3

В качестве линейного масштаба при определении критерия Грасгофа берут для труб и шаров их диаметр, для вертикальных плоскостей – их высоту. Для горизонтальных плоских поверхностей в качестве линейного масштаба берут меньший размер поверхности. Если теплоотдающая поверхность обращена кверху, то полученное расчетное значение α увеличивают на 30 %, если теплоотдающая поверхность обращена книзу – уменьшают на 30 %.

Задачи

Задача 1. По трубе диаметром d (мм) и длиной l (мм) протекает воздух. Средняя температура воздуха t ($^{\circ}\text{C}$), средняя скорость при этой температуре w (м/с).

Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи.

Задача 2. По каналу квадратного сечения, сторона которого a (мм) и длина l (мм), протекает вода со скоростью w (м/с). Средняя температура воздуха t ($^{\circ}\text{C}$), температура внутренней поверхности канала $t_{\text{вн}}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Вычислить плотность теплового потока от стенки канала к воде.

Задача 3. Цилиндрическая трубка диаметром d (мм) охлаждается поперечным потоком воды со скоростью потока w (м/с).

Средняя температура воды $t_{ж}$ ($^{\circ}\text{C}$), температура поверхности трубки $t_{\text{тр}}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности трубки к охлаждающей воде.

Задача 4. Определить средний коэффициент теплоотдачи конвекцией от поперечного потока дымовых газов (состоящих из CO_2 , H_2O и N_2) к стенкам труб, расположенных в шахматном порядке (количество рядов 4). Поперечный шаг труб $s_1 = 2,5d$, продольный – $s_2 = 2,0d$. Средняя скорость потока газов w (м/с). Температура газа перед пучком – $t_{ж1}$ ($^{\circ}\text{C}$), за пучком $t_{ж1}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Задача 5. В теплообменнике шахматный пучок труб обтекается поперечным потоком трансформаторного масла. Внешний диаметр труб в пучке d (мм). Поперечный шаг s_1 , продольный – s_2 . Средняя скорость w (м/с), средняя температура масла $t_{ж}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности труб к маслу для третьего ряда труб пучка.

Задача 6. Трубчатый воздухоподогреватель предполагается выполнить из труб диаметром d (мм), расположенных в коридорном порядке с поперечным и продольным шагами $s_1 = s_2$. Число труб в одном ряду поперек потока выбрано m , число труб в ряду вдоль потока – n . Температуры воздуха, поступающего в подогреватель и выходящего из подогревателя, $t_{ж1}$ ($^{\circ}\text{C}$) и $t_{ж2}$ ($^{\circ}\text{C}$) соответственно. Температура стенок труб $t_{\text{ст}}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Какой длины должны быть трубы, чтобы при скорости воздуха w (м/с) количество теплоты, передаваемое воздуху, составляло Q ?

Задача 7. Вычислить потери теплоты с 1 м^2 поверхности горизонтального теплообменника, корпус которого имеет цилиндрическую форму и охлаждается свободным потоком воз-

духа. Наружный диаметр корпуса теплообменника d (мм), температура поверхности t_c ($^{\circ}\text{C}$) и температура воздуха $t_{\text{ж}}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Задача 8. Определить коэффициент теплоотдачи от вертикальной плиты высотой H (м) к окружающему воздуху, если известно, что температура поверхности плиты t_c ($^{\circ}\text{C}$), температура окружающего воздуха $t_{\text{ж}}$ ($^{\circ}\text{C}$).

Исходные данные для расчета

Задача 1

Вариант	d , мм	l , м	t , $^{\circ}\text{C}$	w , м/с
1	50	1,5	200	15
2	60	1,6	190	12
3	55	1,7	180	10
4	65	1,8	220	9
5	70	1,9	250	18
6	75	2,0	300	20
7	80	2,2	350	22
8	90	2,4	400	25

Задача 2

Вариант	a , мм	l , м	t , $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{вн}}$, $^{\circ}\text{C}$	w , м/с
1	20	3,5	10	40	0,1
2	40	3,7	20	42	0,05
3	25	4,0	30	50	0,06
4	20	4,0	35	60	0,04
5	15	2,8	40	65	0,03
6	20	3,0	45	80	0,05
7	35	3,0	50	85	0,03
8	40	4,5	60	90	0,02

Задача 3

Вариант	d , мм	w , м/с	t , °C	$t_{тр}$, °C
1	20	1	10	50
2	10	1,5	15	55
3	15	2	20	60
4	25	2,5	25	70
5	30	3	5	55
6	35	3,5	18	65
7	40	4	22	60
8	10	4,5	12	50

Задача 4

Вариант	P_{H_2O} , %	P_{CO_2} , %	P_{N_2} , %	d , мм	w , м/с	$t_{ж 1}$, °C	$t_{ж 2}$, °C
1	11	13	76	80	10	1100	900
2	11	13	76	70	12	1150	950
3	11	13	76	90	9	1200	1000
4	11	13	76	70	12	1000	800
5	11	13	76	60	14	1150	900
6	11	13	75	50	15	1000	850
7	11	13	76	90	8	900	650
8	11	13	76	100	11	800	550

Задача 5

Вариант	d , мм	s_1	s_2	w , м/с	$t_{ж}$, °C
1	20	2,5	1,5	0,6	40
2	25	2,5	2,5	0,7	45
3	30	2,5	1,5	0,8	50
4	35	2,5	2,5	0,9	55
5	40	2,5	1,5	1,0	60
6	45	2,5	2,5	1,1	65
7	50	2,5	1,5	1,2	70
8	55	2,5	2,5	1,3	75

Задача 6

Вариант	d , мм	s_1	m	n	$t_{ж1}$, °C	$t_{ж2}$, °C	$t_{ст}$, °C	w , м/с	Q , кВт
1	38	2,5d	8	5	20	80	150	10	125
2	40	2,0d	9	5	22	90	160	11	120
3	42	2,2d	7	4	24	70	140	12	110
4	34	2,3d	8	4	26	100	160	9	100
5	32	2,4d	7	4	28	110	170	8	130
6	30	2,5d	9	4	30	80	150	10	135
7	28	2,0d	10	3	32	90	180	13	115
8	44	2,3d	11	3	20	100	190	14	100

Задача 7

Вариант	d , мм	t_c , °C	$t_{ж}$, °C
1	400	200	30
2	350	180	28
3	300	160	26
4	250	140	24
5	200	120	22
6	150	100	20
7	100	220	18
8	450	240	16

Задача 8

Вариант	H , м	t_c , °C	$t_{ж}$, °C
1	2,0	100	20
2	2,5	90	22
3	2,7	80	24
4	3,0	70	26
5	3,5	60	28
6	4,0	110	18
7	4,5	120	16
8	5,0	130	14

Тема 7. ТЕПЛООБМЕН СОВМЕСТНО ИЗЛУЧЕНИЕМ, КОНВЕКЦИЕЙ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

Задачи

Для решения задач этой темы необходимо повторить предыдущие темы и пользоваться соответствующими формулами.

Задача 1. Температура наружной поверхности стенки печи t_n ($^{\circ}\text{C}$), окружающего воздуха t_c ($^{\circ}\text{C}$). Высота стенки печи H (м), ширина B (м), степень черноты поверхности стенки ε .

Определить тепловой поток, передаваемый от стенки к воздуху конвекцией и излучением.

Задача 2. Между двумя параллельно расположенными пластинами (абсолютно черными) происходит теплообмен излучением и теплопроводностью. Температура пластин T_1 (К) и T_2 (К), расстояние между ними δ (м), теплопроводность воздуха λ ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$).

Определить плотность теплового потока от горячей пластины к холодной.

Задача 3. Определить теплопроводность среды между двумя поверхностями, если плотность суммарного теплового потока конвекцией и теплопроводностью равна q_{Σ} ($\text{Вт}/\text{м}^2$), коэффициент теплоотдачи конвекцией α ($\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$), температуры поверхностей t_1 и t_2 ($^{\circ}\text{C}$) соответственно. Расстояние между поверхностями δ (м).

Задача 4. Определить плотность теплового потока излучением и конвекцией между двумя горизонтальными пластинами, расположенными в воздухе на расстоянии δ (м) друг от друга. Температуры поверхности пластин t_1 и t_2 ($^{\circ}\text{C}$). Степени черноты ε_1 , ε_2 соответственно.

Исходные данные для расчета

Задача 1

Вариант	$t_{п}, ^\circ\text{C}$	$t_{с}, ^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	ε
1	80	10	2	4	0,8
2	75	22	1,5	4,5	0,75
3	70	24	1,75	5,0	0,8
4	65	20	2,3	5,5	0,75
5	60	18	2,5	6,0	0,8
6	55	16	3,0	6,5	0,75
7	50	14	3,5	7,0	0,8
8	45	12	3,75	10	0,75

Задача 2

Вариант	$T_1, \text{ К}$	$T_2, \text{ К}$	$\delta, \text{ м}$	$\lambda, \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$
1	800	400	0,2	0,02
2	900	300	0,3	0,015
3	1000	400	0,4	0,1
4	1100	450	0,1	0,03
5	1200	500	0,05	0,04
6	1300	550	0,5	0,05
7	1400	600	0,6	0,06
8	1500	650	0,15	0,07

Задача 3

Вариант	$q_{\Sigma}, \text{ Вт/м}^2$	$\alpha, \text{ Вт/(\text{м}^2\cdot\text{К})}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\delta, \text{ м}$
1	4000	12	600	300	0,2
2	6000	18	500	320	0,05
3	8000	28	700	500	0,06
4	6000	10	800	450	0,08
5	100000	120	900	100	0,1
6	3000	30	100	10	0,02
7	14000	100	400	300	0,01
8	20000	90	450	250	0,05

Задача 4

Вариант	δ , м	t_1 , °C)	t_2 , °C	ε_1	ε_2
1	0,2	500	100	0,85	0,8
2	0,1	600	150	0,82	0,8
3	0,04	700	300	0,8	0,8
4	0,05	800	200	0,78	0,8
5	0,01	900	400	0,75	0,8
6	0,05	1000	700	0,7	0,8
7	0,02	1100	400	0,65	0,8
8	0,06	400	20	0,6	0,8

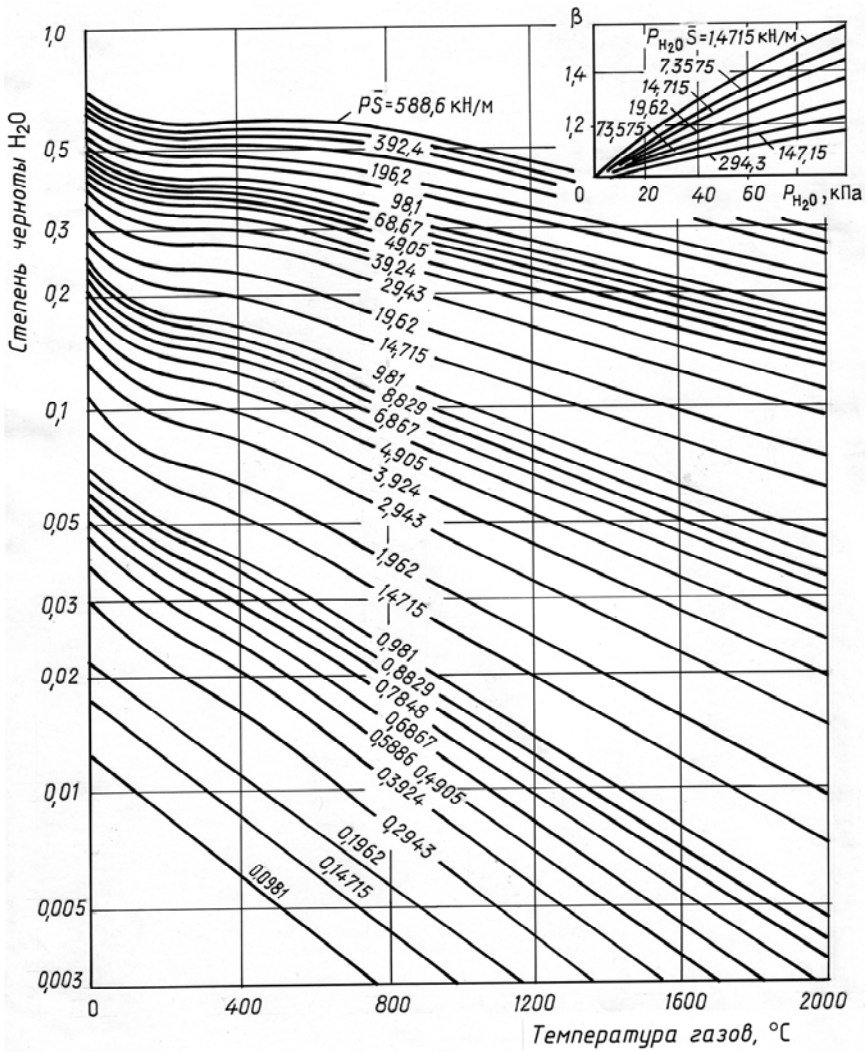


Рис. П2. Номограмма для определения ϵ_{H_2O}

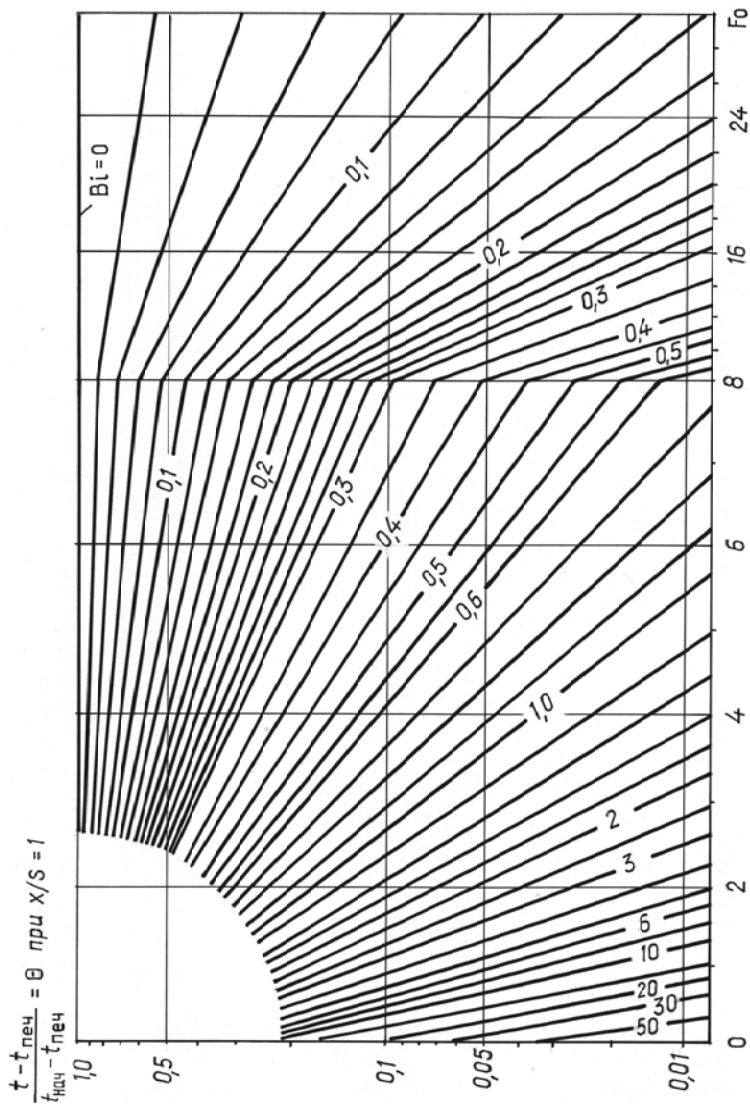


Рис. П13. Зависимость безразмерной температуры от критериев Bi и Fo для поверхности пластины

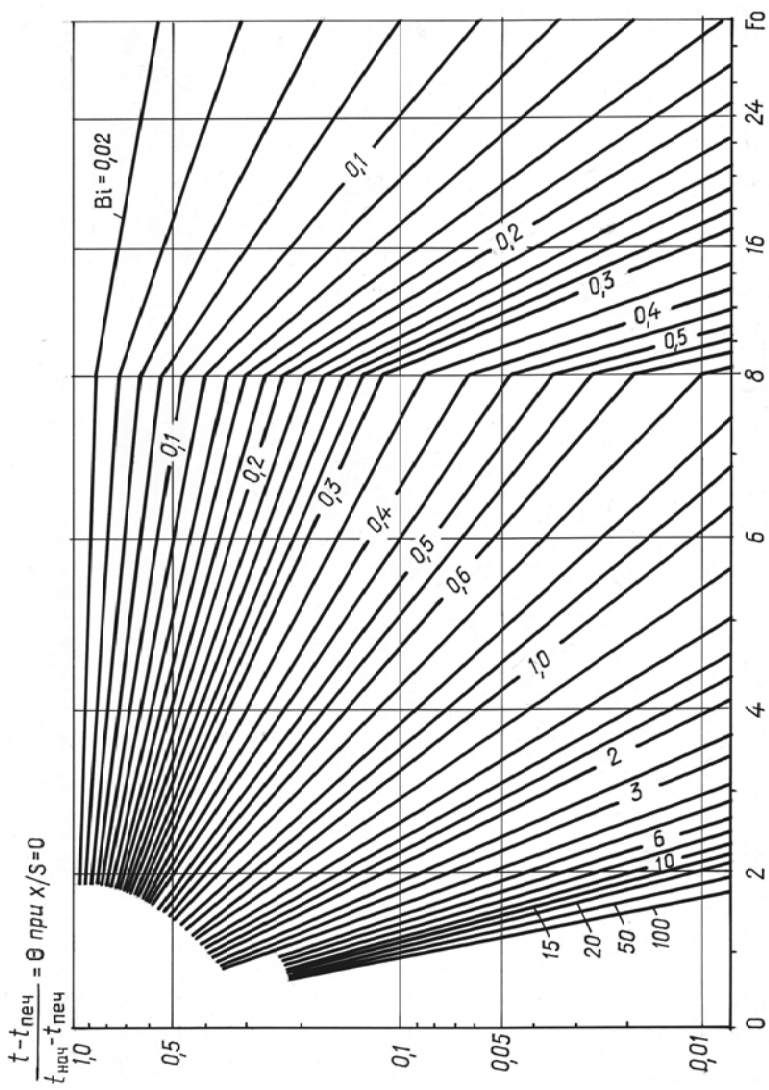


Рис. П4. Зависимость безразмерной температуры от критериев Bi и Fo для середины пластины

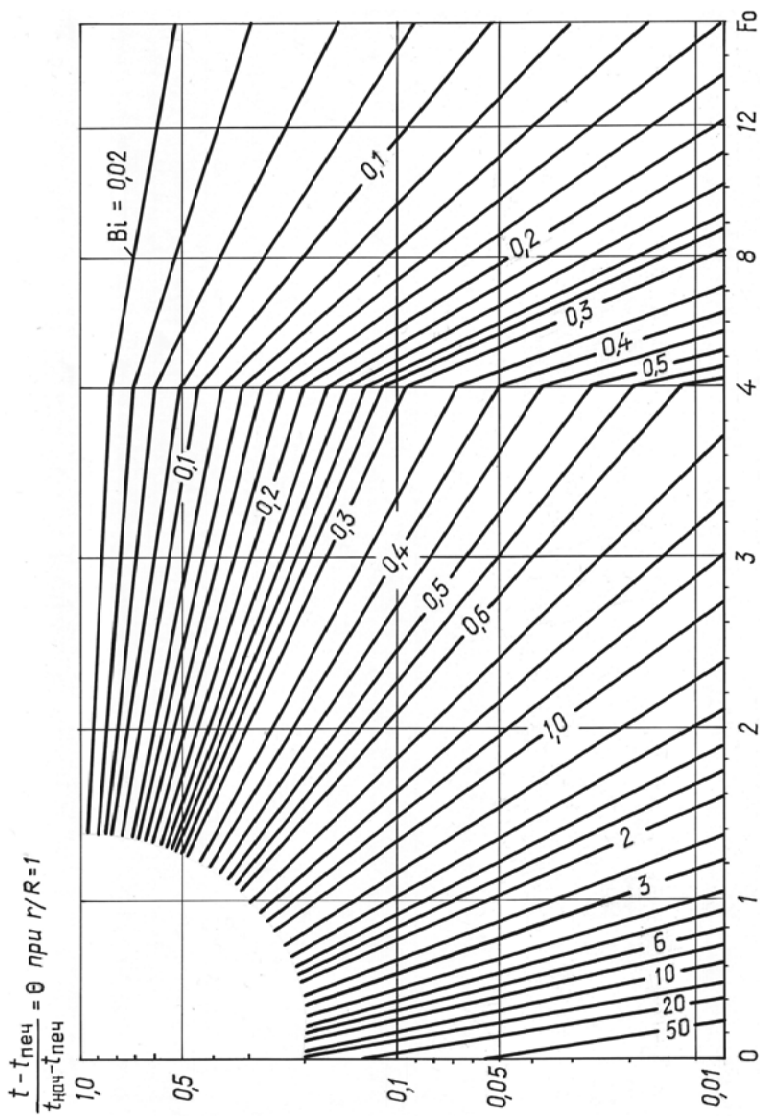


Рис. П5. Зависимость безразмерной температуры от критериев Bi и Fo для поверхности цилиндра

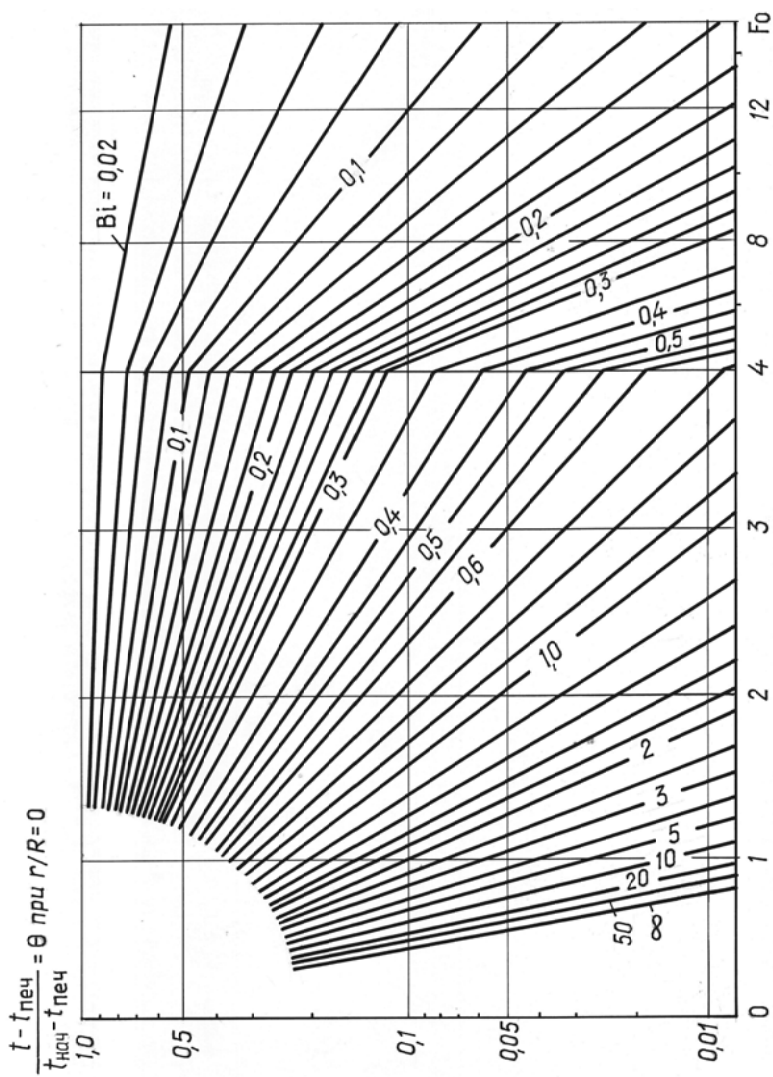


Рис. Пб. Зависимость безразмерной температуры от критериев Bi и Fo для оси цилиндра

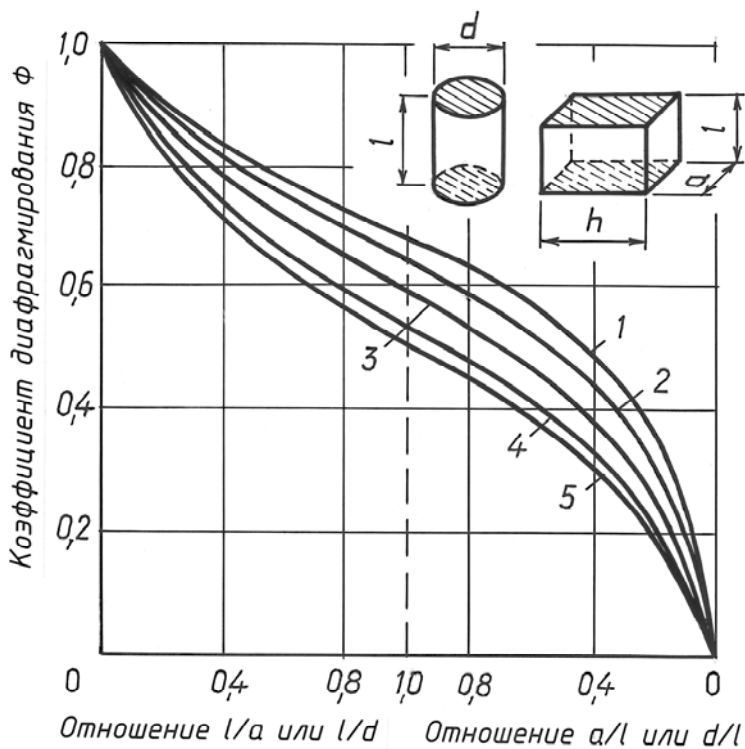


Рис. П7. Коэффициент диафрагмирования:
 1 – длинные полосы, $a/h = 0$; 2 – прямоугольники, $a/h = 0,2$;
 3 – то же, $a/h = 0,5$; 4 – квадраты, $a/h = 1$; 5 – круги