

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)»
(СПбГТИ (ТУ))**

Кафедра оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры

Р.Ш. Абиев

ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЕ С ОСНОВАМИ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Учебное пособие

Задания для студентов очной и заочной формы,
обучающихся по направлению 08.03.01 (270800) «Строительство»

Санкт-Петербург
2014

Студентам заочной формы обучения необходимо выполнить три контрольные работы, представленные ниже.

Номер варианта определяется следующим образом: к номеру студента по списку группы прибавляется последняя цифра текущего календарного года. Если результат превышает число 30, то из него следует вычесть число 30.

Тема 1. ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ.
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Задача 1.1 Определить свойства влажного воздуха (относительную влажность, энтальпию, парциальное давление водяного пара, температуру мокрого термометра, температуру точки росы) при заданной температуре t и влагосодержании x воздуха, используя диаграмму Рамзина-Молье.
Исходные данные см. в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные к задаче 1.1.

№ вар	$t, ^\circ\text{C}$	$x, \text{кг/кг}$	№ вар	$t, ^\circ\text{C}$	$x, \text{кг/кг}$	№ вар	$t, ^\circ\text{C}$	$x, \text{кг/кг}$
1	20	0,01	11	40	0,03	21	55	0,01
2	25	0,01	12	40	0,035	22	55	0,015
3	25	0,015	13	50	0,01	23	55	0,02
4	30	0,01	14	50	0,015	24	55	0,025
5	30	0,015	15	50	0,02	25	55	0,03
6	30	0,02	16	50	0,025	26	55	0,035
7	40	0,01	17	50	0,03	27	90	0,04
8	40	0,015	18	50	0,035	28	90	0,045
9	40	0,02	19	90	0,02	29	90	0,05
10	40	0,025	20	90	0,03	30	90	0,055

Тема 2. ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

Задача 2.1 Известны температуры t_1 , t_2 на поверхности стены и удельный тепловой поток q , проходящий через нее при установившемся режиме. Определить коэффициент теплопроводности материала стены. Изобразить распределение температуры по толщине стены. Толщина стены δ равна 250 мм для вариантов 1-10, 500 мм для вариантов 11-20, 750 мм для вариантов 21-30. Остальные исходные данные см. в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные к задаче 2.1.

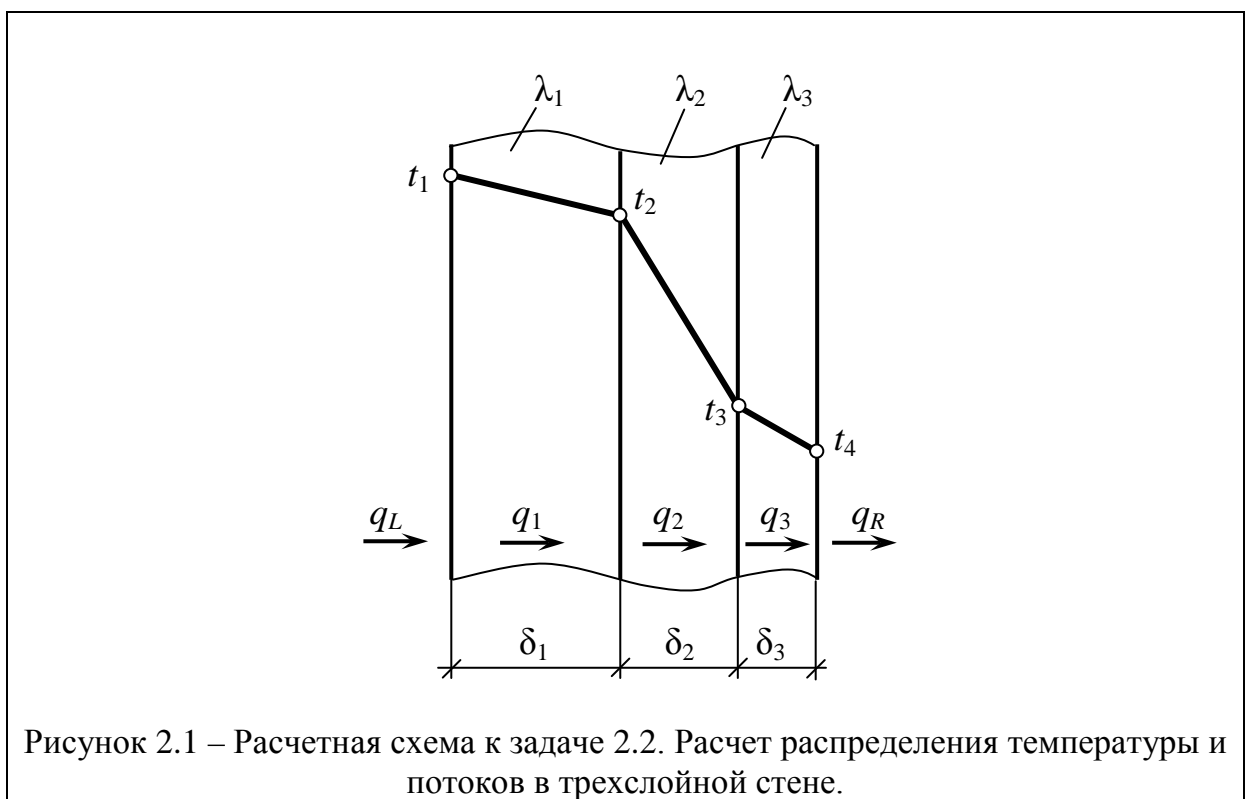
№ вар	t_1 , °C	t_2 , °C	q , Вт/м ²	№ вар	t_1 , °C	t_2 , °C	q , Вт/м ²	№ вар	t_1 , °C	t_2 , °C	q , Вт/м ²
1	120	20	18	11	140	20	134	21	155	26	29
2	75	20	9,9	12	140	10	11,7	22	155	0	14
3	55	18	10,36	13	150	15	13,2	23	255	37	11,5
4	130	25	29,4	14	150	25	17,5	24	255	48	12
5	110	25	37,4	15	150	35	34	25	20	-15	26
6	100	25	33,0	16	50	0	11	26	20	-10	4,3
7	140	20	52,8	17	50	-12	14	27	190	35	6,3
8	20	-25	100,8	18	50	-28	27	28	190	45	33
9	20	-30	28,0	19	190	48	235	29	290	50	35
10	20	-50	12,6	20	190	-20	16	30	290	60	14,2

Задача 2.2 Известны температуры t_1 , t_4 на поверхности трехслойной стены при установившемся режиме. Рассчитать температуры t_2 , t_3 на границах слоев и удельный тепловой поток q , проходящий через нее при известных коэффициентах теплопроводности материалов слоев λ_1 , λ_2 , λ_3 и их толщинах δ_1 , δ_2 , δ_3 (рис. 1.1). Изобразить распределение температуры по толщине стены. Проанализировать влияние коэффициентов теплопроводности на наклон линий температур в слоях. Исходные данные см. в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Исходные данные к задаче 2.2.

№ вар	t_1 , °C	t_4 , °C	δ_1 , мм	δ_2 , мм	δ_3 , мм	λ_1 , Вт/м К	λ_2 , Вт/м К	λ_3 , Вт/м К
1	20	-25	250	100	65	0,11	0,045	0,56
2	25	-22	500	150	120	0,14	0,047	0,45
3	22	-27	250	100	65	0,16	0,049	0,47
4	18	-30	500	50	250	0,16	0,053	0,65
5	16	-45	750	50	65	0,22	0,055	0,52
6	20	-25	500	150	160	0,23	0,049	0,63
7	25	-22	250	100	170	0,27	0,053	0,57
8	22	-27	500	50	120	0,14	0,055	0,42
9	18	-30	750	150	65	0,16	0,045	0,47
10	16	-45	750	100	250	0,16	0,047	0,65

11	20	-25	750	50	65	0,22	0,049	0,52
12	25	-22	250	150	160	0,23	0,049	0,63
13	22	-27	500	100	170	0,27	0,053	0,57
14	18	-30	750	50	160	0,16	0,055	0,42
15	16	-45	500	50	170	0,16	0,049	0,56
16	20	-25	250	150	120	0,22	0,053	0,45
17	25	-22	500	100	65	0,23	0,049	0,47
18	22	-27	750	150	250	0,27	0,053	0,65
19	18	-30	750	100	65	0,28	0,055	0,52
20	16	-45	750	100	55	0,16	0,057	0,65
21	20	-25	250	50	45	0,22	0,055	0,52
22	25	-22	500	50	65	0,23	0,045	0,63
23	22	-27	750	150	160	0,27	0,054	0,57
24	18	-30	500	100	170	0,14	0,055	0,42
25	16	-45	250	50	160	0,16	0,045	0,47
26	20	-25	500	150	170	0,22	0,049	0,52
27	25	-22	500	50	20	0,23	0,049	0,63
28	22	-27	250	50	40	0,27	0,053	0,57
29	18	-30	500	50	80	0,32	0,055	0,64
30	16	-45	750	50	130	0,31	0,049	0,62



Рекомендации к решению задачи 2.2.

Уравнение Фурье для поверхностной плотности теплового потока

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (2.1)$$

позволяет рассчитать потоки во всех трех слоях стены

$$q_i = -\lambda_i \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_i, \quad (2.2)$$

где i – номер слоя стены, $i = 1 - 3$.

При установившемся режиме распределение температуры в плоской стенке линейное, поэтому градиент температуры в соответствующем слое стены легко найти по формуле:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_i = \frac{t_{i+1} - t_i}{\delta_i}, \quad (2.3)$$

где t_{i+1}, t_i - температуры на границах i -го слоя;
 δ_i – толщина i -го слоя.

Для каждого из трех слоев стенки из уравнений (2.2) и (2.3) следует:

$$q_i = -\lambda_i \frac{t_{i+1} - t_i}{\delta_i}. \quad (2.4)$$

Согласно закону сохранения энергии при установившемся режиме потоки во всех слоях равны друг другу, а также потокам на левой и правой границах. Обозначим эти потоки q :

$$q_L = q_1 = q_1 = q_1 = q_R \equiv q. \quad (2.5)$$

Выразим разность температур на границах слоев из формул (2.4)

$$t_i - t_{i+1} = q_i \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (2.6)$$

Сложив левые и правые части уравнений (2.6) для $i = 1 - 3$, получим разность температур на границах трехслойной стенки:

$$t_1 - t_4 = \sum_{i=1}^3 (t_i - t_{i+1}) = \sum_{i=1}^3 q_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right). \quad (2.7)$$

Приведем уравнение (2.6) к форме (2.4), вводя эффективную теплопроводность λ_e трехслойной стенки толщиной $\sum_{i=1}^3 \delta_i$:

$$q = -\lambda_e \frac{t_4 - t_1}{\sum_{i=1}^3 \delta_i}. \quad (2.8)$$

Физический смысл эффективной теплопроводности λ_e : это теплопроводность трехслойной стены, приведенная к полной ее толщине и разности температур $t_1 - t_4$.

Подстановка уравнения (2.8) в (2.7) позволяет найти

$$\lambda_e = \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)^{-1} \sum_{i=1}^3 \delta_i. \quad (2.9)$$

Методика решения данной задачи сводится к расчету эффективной теплопроводности по уравнению (2.9), расчету потоков по (2.8), и последовательному определению температур t_2, t_3 по формулам (2.6).

Отметим, что уравнение (2.9) можно записать в форме

$$\lambda_e = \sum_{i=1}^3 \delta_i / \sum_{i=1}^3 R_i, \quad (2.10)$$

где R_i – термические сопротивления слоев, $R_i = \delta_i/\lambda_i$. Таким образом, уравнение (2.10) показывает, что общее термическое сопротивление стены $\sum_{i=1}^3 \delta_i / \lambda_e$ аддитивно по отношению к термическим сопротивлениям составляющих ее слоев.

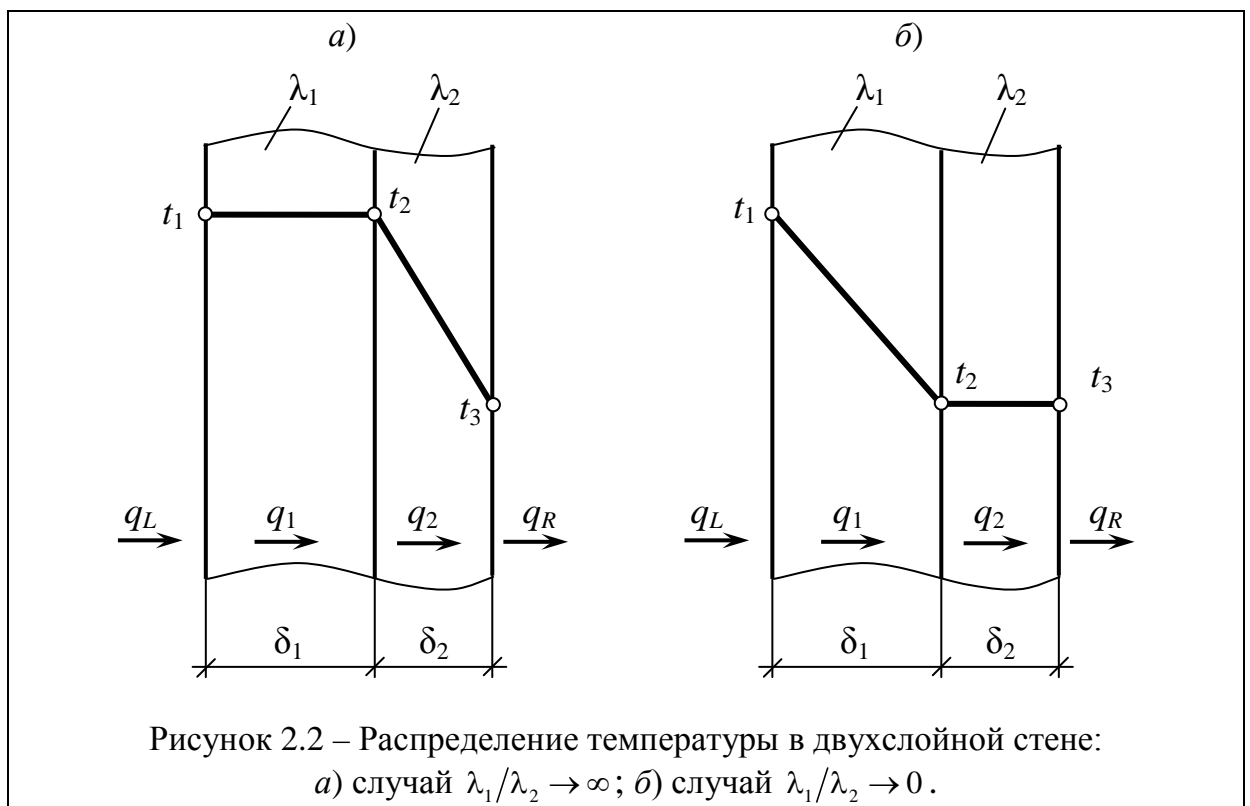
Уравнение (2.9) легко обобщается на любое количество слоев. Интересно проанализировать влияние на эффективную теплопроводность многослойной стенки соотношения между теплопроводностью слоев.

Для этого рассмотрим уравнение (2.9) применительно к более простому случаю двухслойной стены. После несложных преобразований оно примет вид:

$$\lambda_e = (\delta_1 + \delta_2) \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)^{-1} = (\delta_1 + \delta_2) \frac{\lambda_1}{\delta_1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \delta_2}. \quad (2.11)$$

При $\lambda_1/\lambda_2 \rightarrow \infty$ получим $\lambda_e = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\delta_2} \lambda_2$, что соответствует увеличению теплопроводности в двухслойной стене в $(\delta_1 + \delta_2)/\delta_2$ раз относительно λ_2 . Отметим, что в материале с бесконечно высокой теплопроводностью λ_1 распределение температуры при этом равномерное (рисунок 2.2 а).

При $\lambda_1/\lambda_2 \rightarrow 0$ получим $\lambda_e = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\delta_1} \lambda_1$, что соответствует увеличению теплопроводности в двухслойной стене в $(\delta_1 + \delta_2)/\delta_1$ раз относительно λ_1 . В этом случае распределение температуры равномерное в материале с теплопроводностью λ_2 (рисунок 2.2 б).



Задача 2.3 Рассчитать критический диаметр теплоизоляции трубы $d_{кр}$ (рисунок 2.3), если материал теплоизоляции имеет теплопроводность $\lambda_{из}$, а коэффициент теплоотдачи от поверхности теплоизолированной трубы α_2 . Построить зависимость тепловых потерь от диаметра теплоизоляции $Q_{п}(d_3)$. Записать выражение для расчета эффективного диаметра $d_{эф}$, при достижении которого тепловой поток с поверхности теплоизоляции такой же, как с поверхности трубы без изоляции. Найти минимальную теплопроводность материала теплоизоляции $\lambda_{из2}$, обеспечивающего монотонное снижение тепловых потерь при увеличении диаметра теплоизоляции.

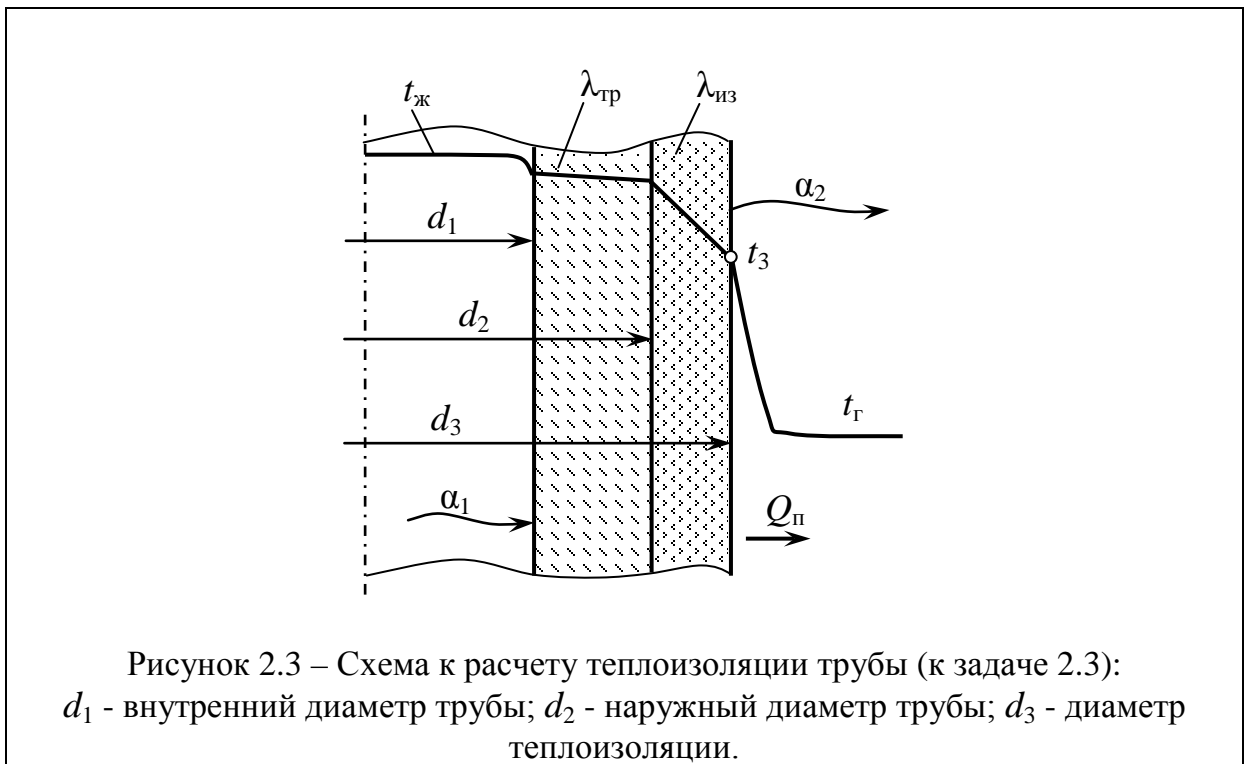


Таблица 2.3 – Исходные данные к задаче 2.3.

№ вар	λ_{isol} , Вт/м К	α_2 , Вт/м ² К	№ вар	λ_{isol} , Вт/м К	α_2 , Вт/м ² К	№ вар	λ_{isol} , Вт/м К	α_2 , Вт/м ² К
1	0,045	20	11	0,049	220	21	0,055	260
2	0,047	30	12	0,049	160	22	0,045	100
3	0,049	28	13	0,053	145	23	0,054	237
4	0,053	35	14	0,055	125	24	0,055	48
5	0,055	67	15	0,049	135	25	0,045	85
6	0,049	125	16	0,053	90	26	0,049	110
7	0,053	120	17	0,049	122	27	0,049	135
8	0,055	75	18	0,053	28	28	0,053	45
9	0,045	300	19	0,055	148	29	0,055	50
10	0,047	250	20	0,057	200	30	0,049	60

Рекомендации к решению задачи 2.3.

Запишем закон Ньютона-Рихмана для наружной поверхности изоляции цилиндрической трубы:

$$Q_{\text{п}} = \alpha_2 (t_3 - t_{\text{г}}) \pi d_3 L, \quad (2.12)$$

где t_3 - температура наружной поверхности теплоизоляции, К;
 $t_{\text{г}}$ - температура газа (воздуха), омывающего поверхность изоляции, К;
 L - длина трубы, м.

Произведение $\pi d_3 L$ представляет собой площадь поверхности изоляции.

Из рисунка 2.3 очевидно, что с увеличением толщины теплоизоляции (а значит, и диаметра d_3) температура t_3 будет снижаться. При этом, однако, с ростом d_3 увеличивается и площадь поверхности теплоизоляции $F = 2\pi d_3 L$.

Таким образом, для цилиндрической поверхности (в отличие от плоской, для которой площадь не зависит от толщины теплоизоляции) имеют место два конкурирующих процесса, влияющих на величину полного потока в соответствии с формулой (2.12).

Это свидетельствует о возможности существования экстремума функции $Q_{\text{п}}$. Основное уравнение теплопередачи

$$Q_{\text{п}} = K (t_{\text{ж}} - t_{\text{г}}) L, \quad (2.13)$$

где K - коэффициент теплопередачи цилиндрической стенки, Вт/м К,
 $t_{\text{ж}}$ - температура жидкости в трубе, К.

Коэффициент теплопередачи связан с термическими сопротивлениями пограничных слоев $1/\alpha_1 r_1$ и $1/\alpha_2 r_3$, и термическими сопротивлениями трубы и изоляции, известным из теории теплопроводности [1], и полным термическим сопротивлением R цилиндрической стенки соотношением

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{\alpha_2 r_{n+1}} \right)^{-1} = \frac{1}{R} \quad (2.14)$$

В рассматриваемом случае число слоев $n = 2$. При заданной разности температур $(t_{\text{ж}} - t_{\text{г}})$ максимум теплового потока определим по условию экстремума полного термического сопротивления R :

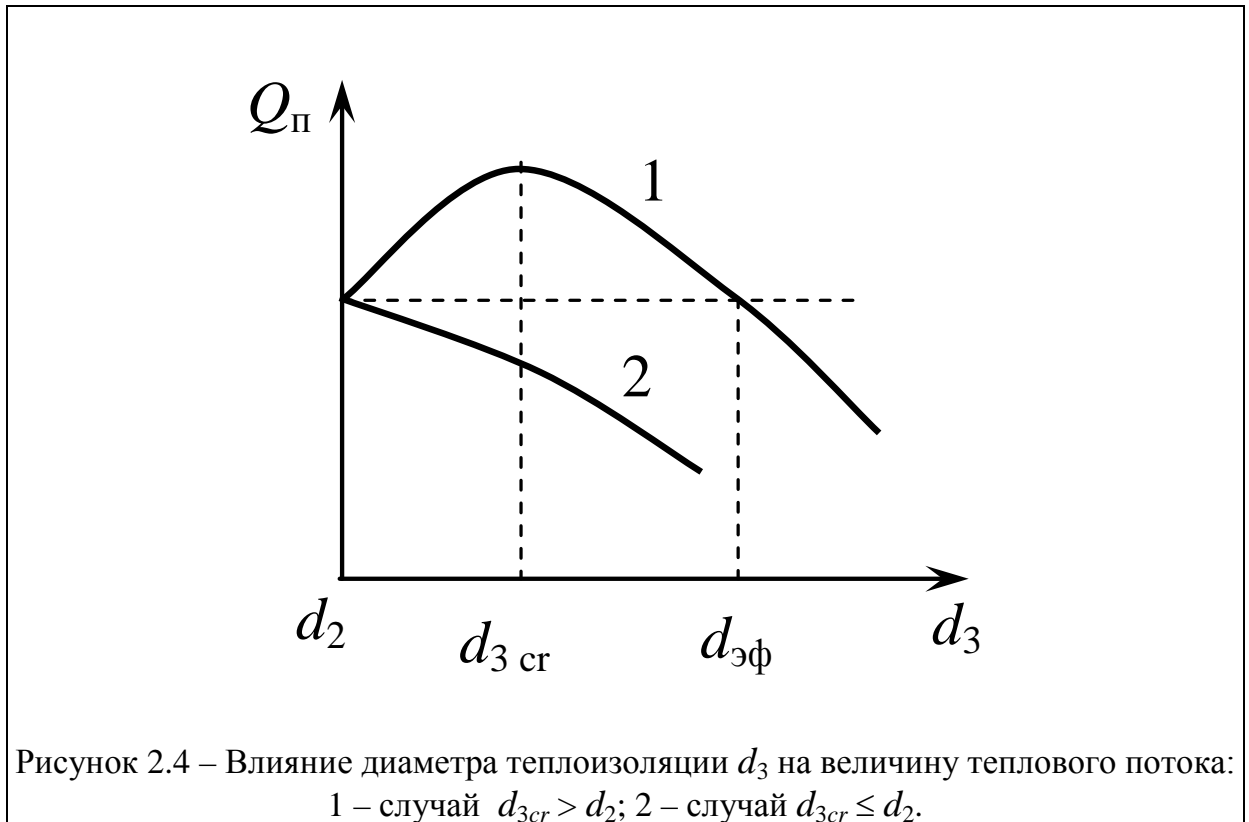
$$\frac{\partial R}{\partial d_3} = 0, \text{ или } \frac{\partial}{\partial d_3} \left[\frac{1}{2\pi} \left(A + \frac{1}{\lambda_{\text{isol}}} \ln d_3 + \frac{2}{\alpha_2 d_3} \right) \right] = \frac{1}{\lambda_{\text{isol}} d_3} - \frac{2}{\alpha_2 d_3^2} = 0, \quad (2.15)$$

где A - константа, не зависящая от d_3 ,
откуда находим критический диаметр теплоизоляции

$$d_{3\text{cr}} = \frac{2\lambda_{\text{isol}}}{\alpha_2}. \quad (2.16)$$

Поскольку вторая производная $\frac{\partial^2 R}{\partial d_3^2}(d_{3cr}) > 0$, при $d_3 = d_{3cr}$ имеет место минимум термического сопротивления R и максимум теплового потока Q_{Π} .

На рисунке 2.4 показан характер изменения Q_{Π} от диаметра теплоизоляции d_3 . Если для некоторого материала теплоизоляции и условий



теплоотдачи величина d_{3cr} больше диаметра трубы d_2 (линия 1) то тепловой поток по мере роста d_3 сначала увеличивается (за счет возрастания площади теплоотдачи), а при $d_3 = d_{3cr}$ начинает снижаться. Лишь при $d_3 = d_{эф}$ тепловой поток достигает значения Q_{Π} при отсутствии теплоизоляции.

Линии 2 соответствует случай $d_{3cr} \leq d_2$. Таким образом, если стоит задача уменьшения теплового потока, то надо подбирать материал теплоизоляции с таким значением λ_{isol} , для которого выполнится условие $d_{3cr} \leq d_2$.

Если же на поверхность цилиндра нужно нанести слой материала, но при этом условия его охлаждения не должны ухудшаться, то необходимо выбрать материал, для которого $d_{3cr} > d_2$. Это требование имеет место при изоляции электрических проводов.

Эффективный диаметр $d_{эф}$ рекомендуем найти исходя из следующих соображений. Эффективный диаметр соответствует условию равенства тепловых потоков, а значит, и термических сопротивлений, для трубы без изоляции ($d_3 = d_2$) и трубы с изоляцией диаметром $d_3 = d_{эф}$. Запишем термические сопротивления для двух таких случаев R_1 и R_2 согласно (2.14):

$$R_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{\lambda_{tr}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{2}{\alpha_2 d_2} \right), \quad (2.16a)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{\lambda_{tr}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_{isol}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{2}{\alpha_2 d_3} \right). \quad (2.16b)$$

Приравнивая правые части (2.16) и решая трансцендентное уравнение численно, можем найти значение эффективного диаметра $d_3 = d_{\text{эф}}$.

Список литературы

1. Галин Н.М., Кириллов Л.П. Тепломассообмен (в ядерной энергетике): Уч. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 376 с.