

УДК 536.7

Методические указания и задачи для самостоятельной работы по курсу "Тепломассообмен" для студентов теплотехнических специальностей. - Томск: изд. ТПУ, 1994. - 33 с.

Составитель Коновалова Л.С.

Рецензент доц. к.т.н. Фурман А.В.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры теоретической и общей теплотехники 24 июня 1993 года.

Зав. кафедрой

Ю.А. Загромов

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Условные обозначения: Q , Вт - тепловой поток; q , Вт/м² - плотность теплового потока; $\partial t / \partial n$, °С/м - градиент температуры; F , м² - площадь изотермической поверхности; λ , Вт/м·°С - коэффициент теплопроводности; α , Вт/м²·°С - коэффициент теплоотдачи; C_0 , Вт/м²·К⁴ - коэффициент излучения абсолютно черного тела; ϵ_k - коэффициент, учитывающий конвекцию в прослойке жидкости или газа; $(Gr \cdot Pr)_{ms} = \left(\frac{\rho \beta (t_c - t_m) \delta^3 \rho_2}{\nu^2} \right) Pr_m$ - произведение чисел Грасгофа и Прандтля; ϵ - степень черноты поверхности; ϵ_{np} - приведенная степень черноты; $\bar{\epsilon}_r$ - предельная степень черноты газа; $\bar{\epsilon}_{rc}$ - предельная степень черноты газа при температуре стенки; ϵ_r - степень черноты газа; t_c - температура стенки, t_m - температура омывающей стенку среды.

Теплота может передаваться тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Передача тепла теплопроводностью описывается законом Фурье

$$Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} F, \text{ Вт},$$

конвективный теплообмен - законом Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha F (t_c - t_m), \text{ Вт}.$$

В основе расчёта лучистого теплообмена лежит закон Стефана-Больцмана

$$Q = C_0 F \left(\frac{T}{100} \right)^4, \text{ Вт},$$

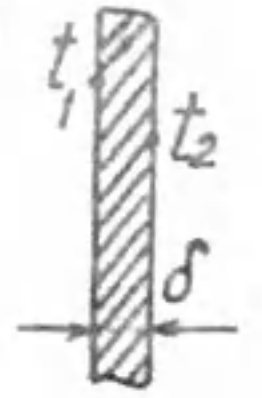
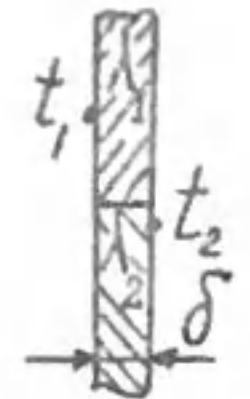
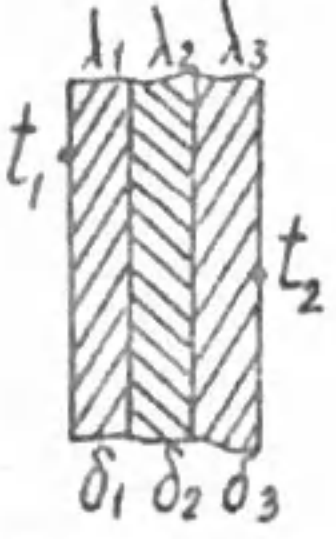
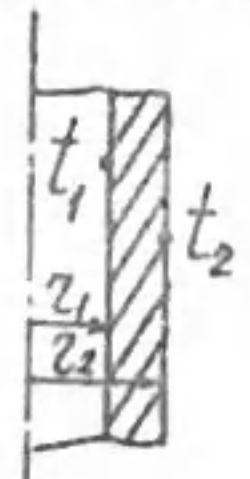
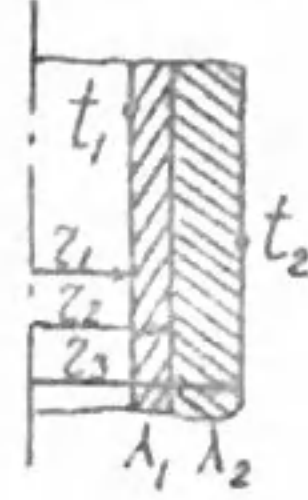
в общем случае

$$Q = \frac{\Delta t}{R},$$

где R , °С/Вт - термическое сопротивление. Для твердых тел (стенки с постоянными температурами на поверхностях) - это термическое сопротивление теплопроводности (см. табл. I), в случае конвективного и лучистого теплообмена между поверхностью и омывающей средой - термическое сопротивление теплоотдачи ($R = \frac{1}{\alpha F}$).

Средний коэффициент теплопроводности многослойных стенок называют эффективным ($\lambda_{эф}$). Определяется он из условия равенства между суммой термических сопротивлений отдельных слоев и термическим сопротивлением однородного слоя с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{эф}$ и толщиной $\delta = \sum \delta_i$.

Таблица I

С т е н к а	Термическое сопротивление теплопроводности
<p>ПЛОСКАЯ СТЕНКА</p> 	$R = \frac{\delta}{\lambda F}$
<p>СОСТАВНАЯ ПЛОСКАЯ СТЕНКА</p> 	$R = \frac{\delta}{(\lambda_1 + \lambda_2) F}$
<p>МНОГОСЛОЙНАЯ ПЛОСКАЯ СТЕНКА</p> 	$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1 F} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 F} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 F}, \quad R = \sum_{i=1}^n R_i$
<p>ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ СТЕНКА</p> 	$R = \frac{1}{2\pi l \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}$
<p>МНОГОСЛОЙНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ СТЕНКА</p> 	$R = \frac{1}{2\pi l \lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi l \lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}$ $R = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi l \lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}$

Для многослойной плоской стенки

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\lambda_{эф}}, \quad \lambda_{эф} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

Получите формулу для вычисления $\lambda_{эф}$ цилиндрической многослойной стенки самостоятельно.

Для многослойных стенок с прослойками газа или жидкости толщиной δ (рис. I) сложный теплообмен в прослойках можно учесть с помощью эквивалентного коэффициента теплопроводности ($\lambda_{эkv}$).

Для прослоек жидкости с учетом конвективного теплообмена

$$\lambda_{эkv} = \lambda \cdot \epsilon_k$$

При $(Gr \cdot Pr)_{ms} \leq 10^3$

$$\epsilon_k = 1, \quad \lambda_{эkv} = \lambda,$$

т.е. конвективным теплообменом можно пренебречь.

При $(Gr \cdot Pr)_{ms} > 10^3$ $\epsilon_k = 0,18 (Gr \cdot Pr)_{ms}^{0,25}$

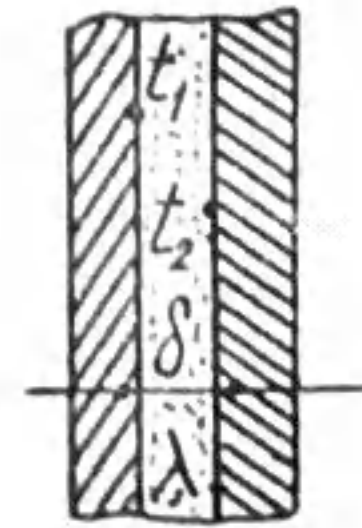


Рис. I

Для газовых прослоек с учетом конвективно-лучистого теплообмена

$$\lambda_{эkv} = \lambda \epsilon_k + \lambda_l$$

Лучистая составляющая коэффициента теплопроводности для плоских прослоек

$$\lambda_l = \frac{q_n \cdot \delta}{t_1 - t_2}$$

для цилиндрических

$$\lambda_l = \frac{Q_n \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}{2\pi l (t_1 - t_2)}$$

Лучистый теплообмен через плоскую прослойку диатермичного газа рассчитывается по формулам

$$q_n = c_0 \epsilon_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$\epsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

через цилиндрическую прослойку диатермичного газа

$$Q_A = C_0 \epsilon_{np} F_2 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт,}$$

$$\epsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$$

Термическое сопротивление теплоотдачи в случае конвективного теплообмена между поверхностью и средой

$$R = \frac{1}{\alpha F},$$

в случае лучисто-конвективного теплообмена

$$R = \frac{1}{\alpha_{экр} F},$$

где $\alpha_{экр} = \alpha + \alpha_n$.

Лучистая составляющая коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_n = \frac{q}{|t_c - t_m|}$$

Лучистый теплообмен между поверхностью (стенкой) и диатермичной средой с температурой t_m описывается уравнением

$$q_n = C_0 \epsilon_c \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right],$$

между поверхностью и излучающим газом

$$q_n = q_{r-c} = \frac{\epsilon_c C_0 \left[\bar{\epsilon}_r \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \bar{\epsilon}_{r-c} \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{\frac{\bar{\epsilon}_r}{\epsilon_r} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1}$$

Наряду с последней формулой для расчета лучистого теплообмена между излучающим газом и наружной поверхностью труб, а также между плоской стенкой и большим объемом излучающего газа можно использовать формулы

$$q_n = \epsilon_{np} C_0 \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right],$$

$$\epsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1}$$

Коэффициент теплопроводности различных материалов зависит от температуры. Эта зависимость может быть представлена в форме таблицы (для газов и жидкостей) или в виде формулы, например для тепло-

изоляционных материалов

$$\lambda(t) = a \pm bt$$

При расчетах теплоты пользуются средним коэффициентом теплопроводности для данного интервала температур (t_1, t_2)

$$\lambda_{cp} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Совместное решение (1) и (2) дает расчетную формулу для вычисления λ_{cp} . Получите ее.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

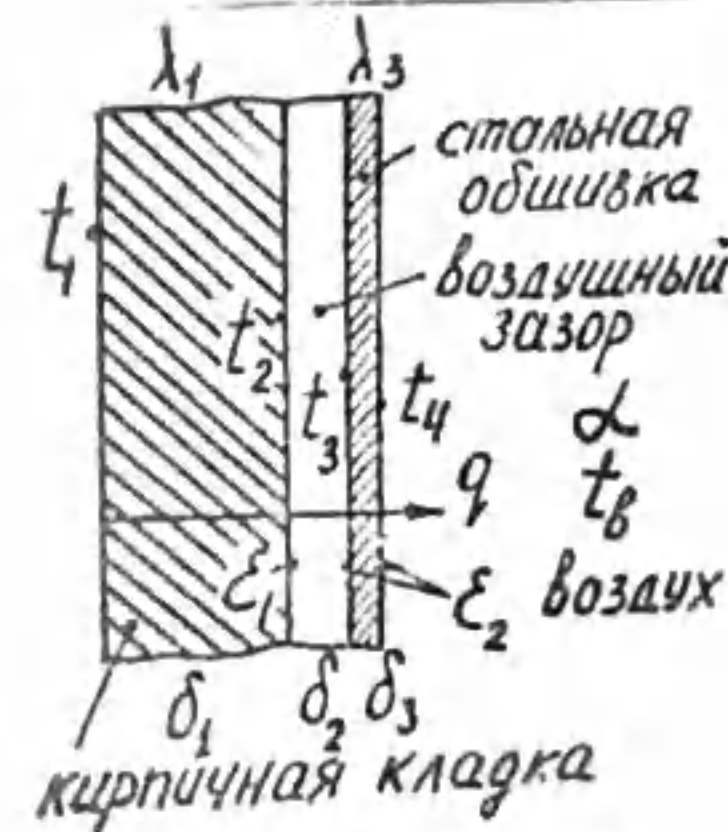


Рис. 2

Стенка топочной камеры выполнена из шамотного кирпича и стальной обшивки (рис. 2).

Дано: $t_1 = 360^\circ\text{C}$, $t_2 = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = 12 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $\delta_1 = 40 \text{ см}$, $\delta_3 = 5 \text{ мм}$.

Рассчитать теплопередачу с 1 м^2 поверхности обшивки в окружающую среду (q , Вт/м^2) и ширину воздушного зазора δ_2 при условии, что температура на наружной поверхности стальной обшивки t_4 не должна превышать 50°C .

Примечание: Конвективным теплообменом в воздушном зазоре пренебречь.

Решение

Теплота передается через трехслойную стенку к воздуху разными способами: через кирпичную кладку - теплопроводностью, $q = q_{r1}$, через воздушный зазор - теплопроводностью и излучением, $q = q_{T2} + q_{Л2}$, через стальную обшивку - теплопроводностью, $q = q_{T3}$, от поверхности обшивки к окружающему воздуху - конвекцией и излучением $q = q_{к4} + q_{Л4}$, т.е.

$$q = q_{T2} = q_{T2} + q_{Л2} = q_{T3} = q_{к4} + q_{Л4}$$

В то же время

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_{экр}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{экр}}} \quad (3)$$

$$q_{T_2} = \frac{t_1 - t_2}{\delta_1 / \lambda_1}, \quad (4)$$

$$q_{T_2} + q_{\lambda_2} = \frac{t_2 - t_3}{\delta_2 / \lambda_{\text{экв}}}, \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_2 + \frac{q_{\lambda_2} \delta_2}{t_2 - t_3}, \quad (6)$$

$$q_{\lambda_2} = C_0 \epsilon_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right], \quad (7)$$

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}, \quad (8)$$

$$q_{T_3} = \frac{t_3 - t_4}{\delta_3 / \lambda_3}, \quad (9)$$

$$q_{\lambda_4} + q_{\lambda_3} = \alpha_{\text{экв}} (t_4 - t_6), \quad (10)$$

$$\alpha_{\text{экв}} = \alpha + \frac{q_{\lambda_4}}{t_4 - t_6}, \quad (11)$$

$$q_{\lambda_4} = C_0 \epsilon_2 \left[\left(\frac{T_4}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_6}{100} \right)^4 \right]. \quad (12)$$

Из приложения к [3] и [4]: степень черноты и коэффициент теплопроводности шамотного кирпича $\epsilon_1 = 0,85$, $\lambda_1 = 0,84$ Вт/м·°С, стали (шероховатая, окисленная) - $\epsilon_2 = 0,95$, $\lambda_3 = 45,4$ Вт/м·°С.

Согласно (12), (11) и (10), передаваемая теплота

$$q_{\lambda_4} = 5,67 \cdot 0,95 \left[\left(\frac{50 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] = 189,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

$$\alpha_{\text{экв}} = 12 + \frac{189,3}{50 - 20} = 18,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}},$$

$$q = 18,3 (50 - 20) = 549,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Температуры t_2 и t_3 , согласно (4) и (9),

$$t_2 = t_1 - \frac{q \delta_1}{\lambda_1} = 360 - \frac{549,3 \cdot 0,4}{0,84} = 98,4 \text{°С},$$

$$t_3 = t_4 + \frac{q \delta_3}{\lambda_3} = 50 + \frac{549,3 \cdot 0,005}{45,4} = 50,1 \text{°С}.$$

Средний коэффициент теплопроводности воздуха для интервала температур $t_2 - t_3$, согласно таблицы приложения [4], $\lambda_2 = 0,0302$ Вт/м·°С.

По формулам (8) и (7) рассчитывается

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,95} - 1} = 0,814,$$

$$q_{\lambda_2} = 5,67 \cdot 0,814 \left[\left(\frac{98,4 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{50,1 + 273}{100} \right)^4 \right] = 375,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Подстановка (6) в (5) и решение относительно δ_2 дает результат: $\delta_2 = 0,0084$ м = 8,4 мм.

Если нет ошибок в расчетах, уравнение (3) должно обратиться в тождество.

ЗАДАЧИ

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Задача № I-1

Стеклянная витрина магазина имеет площадь 12 м^2 и толщину 1 см. Коэффициент теплопроводности стекла $0,8$ Вт/м·°С. В холодный день температура наружной поверхности стекла составляет -1 °С, а температура внутренней поверхности $+3$ °С.

Найти тепловой поток через стекло и температуру в центре по толщине стекла.

Задача № I-2

Стенка печи состоит из внутреннего слоя нержавеющей стали толщиной $1,2$ см, покрытого слоем асбестовой изоляции толщиной 5 см. Температура внутренней поверхности нержавеющей стали равна 800 К, температура наружной поверхности асбеста 350 К.

Найти плотность теплового потока через стенку печи и температуру контактной поверхности стали и асбеста. Коэффициенты теплопроводности стали $\lambda_{\text{ст}} = 19$ Вт/м·°С, асбеста $\lambda_{\text{асб}} = 0,7$ Вт/м·°С.

Задача # I-3

Распределение температуры по толщине плоской стенки с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 2 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ имеет вид $t(x) = 100 + 150x$, где x измеряется в метрах. Найти плотность теплового потока q , (совпадает с направлением оси x или нет?)

Задача # I-4

Тепловой поток 300 Вт подводится к поверхности пластины из плексигласа ($\lambda = 0,195 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$) с температурой 30°C . Толщина пластины 1 см, площадь поверхности 2 м^2 .

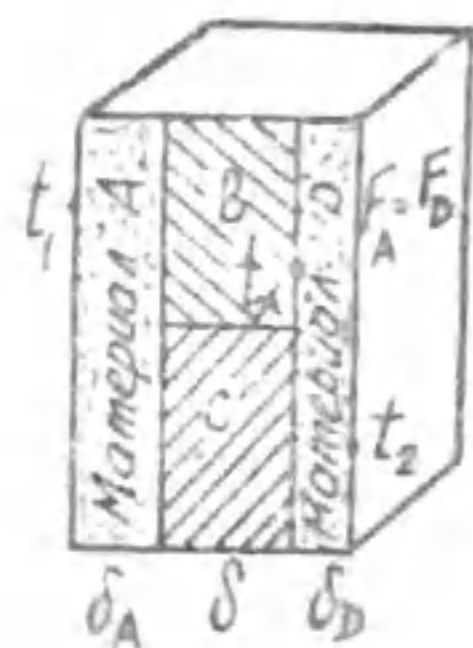
Найти температуру второй поверхности пластины и температуру ее среднего слоя. Чему равен градиент температуры?

Задача # I-5

Тонкий плоский нагреватель площадью $0,2 \text{ м}^2$ с температурой 200°C помещен между двумя одинаковыми слоями теплоизоляции с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,35 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$. Мощность нагревателя 1000 Вт.

Какова толщина двух слоев тепловой изоляции, при которой температура на поверхности изоляции не будет превышать 50°C ?

Задача # I-6



Через составную стенку, показанную на рисунке, происходит одномерный перенос тепла.

Рассчитать тепловой поток через стенку и температуру t_x , если $\lambda_A = 75 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$, $\delta_A = 20 \text{ см}$, $\lambda_B = 60 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$, $\lambda_C = 58 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$, $\delta = 25 \text{ см}$, $\delta_D = 40 \text{ см}$, $\lambda_D = 20 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$, $F_A = F_D = 2 \text{ м}^2$, $t_1 = 500^\circ\text{C}$, $t_2 = 100^\circ\text{C}$.

Задача # I-7

Стена из силикатного кирпича ($\lambda = 0,82 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$) толщиной 250 мм имеет с одной стороны температуру -30°C , а с другой $+20^\circ\text{C}$.

Найти плотность теплового потока через стену.

На каком расстоянии от поверхности стены с отрицательной температурой находится изотермическая поверхность с $t = 0^\circ\text{C}$?

Задача # I-8

Лед ($\lambda = 2,22 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$) на реке имеет толщину 300 мм и покрыт слоем снега ($\lambda = 0,46 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$) толщиной 200 мм. Температура на наружной поверхности снега -15°C , а на поверхности льда, обращенной к воде, 0°C .

Найти плотность теплового потока через эти два слоя. Сравнить перепады температур на 100 мм толщины слоя снега и толщины слоя льда.

Задача # I-9

Плоскую поверхность с температурой 400°C необходимо теплоизолировать при условии, чтобы теплопотери не превышали 450 Вт/м^2 при температуре на наружной поверхности изоляции 43°C . Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda = 0,29 + 0,00045t$.

Найти толщину слоя изоляции.

Задача # I-10

Печь изнутри выложена dinasовым кирпичом ($\lambda = 0,35 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$), за которым следует слой красного кирпича ($\lambda = 0,76 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$) толщиной 250 мм и, наконец, снаружи - слой силикатного кирпича ($\lambda = 0,82 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$) толщиной 60 мм. На внутренней поверхности печи температура 1150°C , на наружной 60°C .

Какова должна быть толщина слоя dinasового кирпича, чтобы температура красного кирпича не превышала 820°C ?

Задача # I-11

Электропровод покрыт изоляцией ($\lambda_{из} = 0,69 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$). Внутренний и наружный радиусы изоляции равны соответственно $r_1 = 5 \text{ мм}$, $r_2 = 10 \text{ мм}$. Электрическое сопротивление 1 м провода $R = 10 \text{ Ом/м}$, ток $I = 9 \text{ А}$. Температура на внутренней поверхности изоляции 150°C .

Определить температуру на наружной поверхности изоляции.

Примечание: Теплота, выделенная в электрических проводниках, рассчитывается по закону Джоуля-Ленца: $Q = I \cdot R \cdot \delta t$.

Задача # I-12

Рассчитать допустимую силу тока по алюминиевому проводу, покрытому резиновой изоляцией ($\lambda = 0,16 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$) толщиной 1 мм, при условии, что на наружной поверхности изоляции температура 50°C , на внутренней поверхности $+70^\circ\text{C}$.

Диаметр провода 2 мм, электрическое сопротивление 1 м провода $= 3,28 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м}$.

Примечание: Теплота, выделяемая в проводниках электрического тока, рассчитывается по закону Джоуля-Ленца: $Q = I \cdot U = I^2 R$, Вт.

Задача № I-13

Трубу покрывают двумя слоями изоляции из разных материалов, но одинаковой толщины. Первый слой, лежащий на трубе, имеет коэффициент теплопроводности в 3 раза больше, чем второй слой. Наружный диаметр конденсированной трубы в 6 раз больше толщины одного слоя изоляции.

В какую сторону и во сколько раз изменятся тепловые потери с 1 м длины трубопровода, если слои изоляции поменять местами?

Температуры на наружной поверхности трубы и на наружной поверхности изоляции в обоих случаях принять неизменными.

Задача № I-14

Труба диаметром 60 мм и длиной 5 м покрыта слоем пробковой плиты ($\lambda = 0,047$ Вт/м $^{\circ}$ С) толщиной 30 мм и сверху слоем соеволита ($\lambda = 0,09$ Вт/м $^{\circ}$ С) толщиной 40 мм. На наружной поверхности трубы температура -110° С, на поверхности соеволита 10° С.

Определить потерю холода за сутки. Сколько будет потеряно холода, если слои изоляции поменять местами?

Значения температур и толщин слоев сохранить.

Задача № I-15

Стальной паропровод диаметром 150 мм имеет температуру 300° С. Его надо покрыть двумя слоями изоляции, причем температура наружной поверхности изоляции не должна превышать 50° С. Для изоляции предлагаются: слой А толщиной 20 мм и теплопроводностью $\lambda_A = 0,037$ Вт/м $^{\circ}$ С и слой Б толщиной 40 мм и теплопроводностью $\lambda_B = 0,14$ Вт/м $^{\circ}$ С.

В какой последовательности надо расположить эти слои на паропроводе, чтобы получить минимальные тепловые потери?

Задача № I-16

Электронагреватель мощностью 1,7 кВт находится внутри фарфоровых труб ($\lambda = 1,04$ Вт/м $^{\circ}$ С), с $d_2/d_1 = 26/20$ мм. Общая длина труб 7 м. На внутренней поверхности труб температура 140° С.

Трубы спущены в раствор, температура кипения которого $125,6^{\circ}$ С. Закипит ли раствор на поверхности труб?

Задача № I-17

Кварцевая труба ($\lambda = 1,58$ Вт/м $^{\circ}$ С), имеющая внутренний диаметр 2,7 мм, толщину стенки 1 мм и длину 100 мм, заполнена жидкостью. Вдоль трубки по центру расположена платиновая нить диаметром 0,1 мм, нагреваемая электрическим током.

Измерения показали: температура нити 221° С, на наружной поверхности трубки 206° С; тепловой поток от нагретой нити через слой жидкости 2,5 Вт.

Найти коэффициент теплопроводности и среднюю температуру жидкости в трубке.

Задача № I-18

По стеклянному трубопроводу ($\lambda = 0,745$ Вт/м $^{\circ}$ С), имеющему внутренний диаметр 56 мм и толщину стенки 3 мм, после тепловой обработки движется молоко со скоростью 0,5 м/с. Теплоемкость молока 3,84 кДж/кг $^{\circ}$ С, плотность 1030 кг/м 3 . На внутренней поверхности трубы температура $74,5^{\circ}$ С.

Определить температуру на наружной поверхности трубы, если на каждые 10 м длины трубопровода температура молока снижается на 1° С.

Примечание: Расход молока $G = w \rho f$, где w - скорость, ρ - плотность, f - сечение труб.

Теплота, теряемая молоком, $Q = G \cdot c \cdot \Delta t$, где c - теплоемкость.

Задача № I-19

Бетонные трубы ($\lambda = 1,28$ Вт/м $^{\circ}$ С), имеющие внутренний диаметр 150 мм и толщину стенки 25 мм, надо проложить в грунте. Температура грунта на внешней поверхности труб может снизиться до $-1,82^{\circ}$ С. Жидкость в трубах замерзает при температуре $-0,5^{\circ}$ С. Можно ли прокладывать трубы без теплоизоляции, если потери теплоты с 1 м длины труб составляют 21,7 Вт?

Задача № I-20

Вычислить допустимую силу тока медного провода диаметром 2 мм, покрытого резиновой изоляцией толщиной 1 мм, при условии, что максимальная температура изоляции не должна быть выше 60° С, а на наружной поверхности изоляции 40° С. Коэффициент теплопроводности $\lambda_{из} = 0,15$ Вт/м $^{\circ}$ С. Электрическое сопротивление медного провода $R = 0,005$ Ом/м.

Примечание: Теплота, выделяемая электрическим проводником, рассчитывается по закону Джоуля-Ленца $Q = I \cdot U = I^2 R$, Вт.

Задача № I-21

Железобетонная дымовая труба ($\lambda = 1,1 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) с $d_2 = 800 \text{ мм}$ и $\delta_2 = 1300 \text{ мм}$ должна быть футерована внутри огнеупорным кирпичом ($\lambda = 0,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$).

Определить толщину футеровки и температуру наружной поверхности трубы из условия, чтобы тепловые потери не превышали 2000 Вт/м , а температура внутренней поверхности железобетонной стенки не превышала 500 °C . Температура внутренней поверхности футеровки 425 °C .

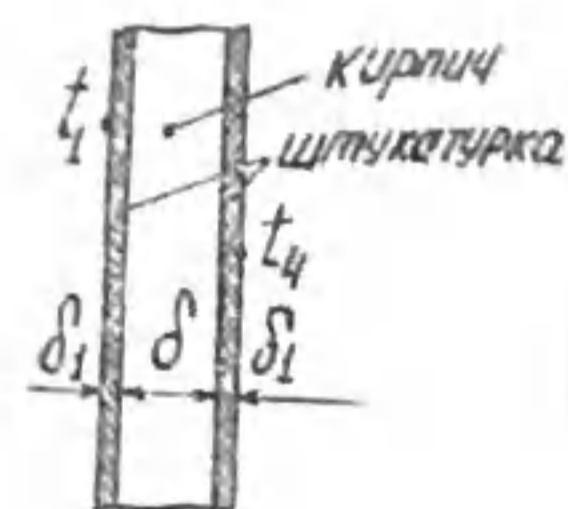
Задача № I-22

Для экспериментального определения коэффициента теплопроводности использовалась круглая пластина из гетинакса диаметром 120 мм , толщиной 15 мм .

Пластина зажималась двумя плоскими поверхностями, температуры которых $t_1 = 80 \text{ °C}$, $t_2 = 30 \text{ °C}$.

Тепловой поток, передаваемый через пластину, замерился, 10 Вт . Какова теплопроводность гетинакса?

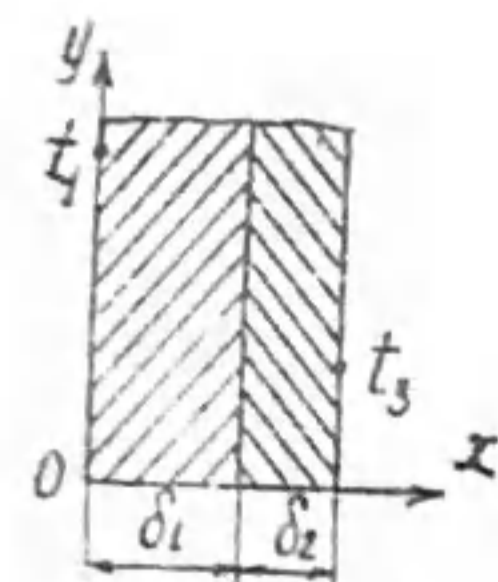
Определить абсолютную и относительную погрешности определения коэффициента теплопроводности, если учесть, что вследствие неидеального контакта между поверхностями и пластиной имеются воздушные зазоры толщиной $0,05 \text{ мм}$ ($\lambda_g = 0,025 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$).



Задача № I-23

Дано: $t_1 = 15 \text{ °C}$, $t_4 = -25 \text{ °C}$, $\delta = 300 \text{ мм}$, $\lambda = 0,3 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\delta_2 = 15 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 0,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$.

На каком расстоянии от поверхности стены с положительной температурой находится изотермическая поверхность с $t = -5 \text{ °C}$?



Задача № I-24

Дано: двухслойная теплоизоляция: карболит, $\delta_1 = 60 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 0,231 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$; резина, $\delta_2 = 30 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 0,16 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $t_1 = 100 \text{ °C}$, $t_3 = 30 \text{ °C}$.

Найти координату изотермической поверхности с $t = 50 \text{ °C}$.

Рассчитать эффективный коэффициент теплопроводности двухслойной изоляции.

Задача № I-25

Рассчитать теплотери с 1 м длины бетонной трубы с $d_1 = 200 \text{ мм}$, $d_2 = 220 \text{ мм}$, $\lambda_g = 1,28 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ при условии, что перепад температуры по толщине стенки составляет 10 °C .

Как изменится результат, если пренебречь кривизной стенки трубы и расчет произвести по формуле для плоской стенки?

Задача № I-26

Трубопровод наружным диаметром $d = 150 \text{ мм}$ имеет трехслойную изоляцию с толщиной слоев $\delta_1 = 20 \text{ мм}$ ($\lambda_1 = 0,15 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$), $\delta_2 = 30 \text{ мм}$ ($\lambda_2 = 0,07 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$), $\delta_3 = 2 \text{ мм}$ ($\lambda_3 = 0,14 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$).

Рассчитать эффективный коэффициент теплопроводности трехслойной изоляции.

Задача № I-27

Теплотери с 1 м длины стального трубопровода, покрытого однослойной изоляцией из войлока составляют 200 Вт . Внутренний и наружный диаметры трубопровода $d_1 = 150 \text{ мм}$, $d_2 = 156 \text{ мм}$, коэффициенты теплопроводности стали $\lambda_c = 45,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, войлока $\lambda_g = 0,0524 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$. Температура внутренней поверхности трубы 180 °C , температура на поверхности изоляции 40 °C .

Определить толщину изоляции.

Задача № I-28

Температуры на внутренней и на наружной поверхностях бетонной трубы с $d_1 = 200 \text{ мм}$, $d_2 = 240 \text{ мм}$ равны соответственно $t_1 = 150 \text{ °C}$, $t_2 = 70 \text{ °C}$. Коэффициент теплопроводности бетона $\lambda = 1,28 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$.

Каковы теплотери с 1 м длины трубы и термическое сопротивление стенки трубы?

На каком расстоянии от внутренней поверхности температура равна 100 °C ?

Задача № I-29

Стальная стенка бака толщиной $\delta_1 = 8 \text{ мм}$ ($\lambda_1 = 45 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) покрыта двумя слоями тепловой изоляции: войлок строительный - $\delta_2 = 20 \text{ мм}$ ($\lambda_2 = 0,05 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) и асбозоолит - $\delta_3 = 15 \text{ мм}$, $\lambda_3 = 0,143 + 0,00019 t$. Температура на поверхности двухслойной изоляции 30 °C , максимальная температура асбозоолита $63,5 \text{ °C}$.

Рассчитать теплотери через 1 м^2 теплоизолированной поверхности, температуру на внутренней поверхности стальной стенки, эффективный коэффициент теплопроводности двухслойной изоляции.

Задача № I-30

Между стальной стенкой овка толщиной $\delta_1 = 8$ мм ($\lambda_1 = 45$ Вт/м $^{\circ}$ С) и облицовкой из текстолита толщиной $\delta_3 = 15$ мм ($\lambda_3 = 0,25$ Вт/м $^{\circ}$ С) находится теплоизолятор ньювель толщиной $\delta_2 = 20$ мм ($\lambda_2 = 0,087 + 0,000064t$). Температура на внутренней поверхности стальной стенки 200° С, максимальная температура текстолитовой плиты $67,8^{\circ}$ С.

Рассчитать плотность теплового потока через трехслойную стенку, температуру на поверхности облицовки, перепады температур в стенках стали и текстолита.

Задача № I-31

Две металлические пластины прижаты друг к другу шероховатыми поверхностями. Из-за неплотного контакта между ними образовалось термическое сопротивление $R = 10^{-2}$ $^{\circ}$ С \cdot м 2 /Вт. Первая пластина толщиной 15 см имеет $\lambda_1 = 45$ Вт/м $^{\circ}$ С, вторая, толщиной 25 см, имеет $\lambda_2 = 70$ Вт/м $^{\circ}$ С. Полный перепад температур между наружными поверхностями пластин составляет 400° С.

Рассчитать плотность теплового потока и перепад температур на поверхности раздела пластин.

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛОСКОЙ СТЕНКИ

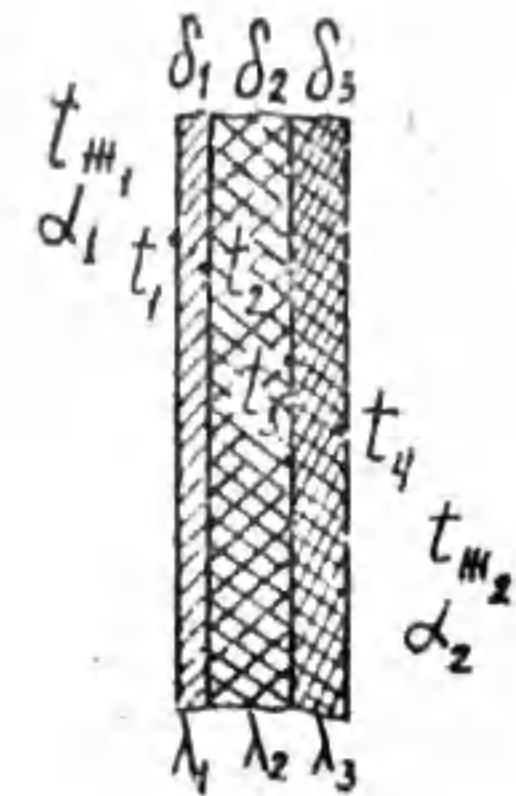
Задача № 2

Стальная стенка толщиной δ_1 покрыта двумя слоями тепловой изоляции толщиной δ_2 и δ_3 .

В табл. 3 указаны величины, которые требуется рассчитать, приведены исходные данные для расчета. Численные значения коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи имеют размерность λ , Вт/м $^{\circ}$ С; α , Вт/м 2 С.

Коэффициенты теплопроводности теплоизоляционных материалов даны в табл. 2.

$\lambda_{эф}$ - средний (эквивалентный) коэффициент теплопроводности двухслойной изоляции.



Если двухслойную теплоизоляцию заменить однослойной из стекловаты, то какой толщины ($\delta_{ст}$) она должна быть, чтобы теплоизоляционные свойства не изменились?

Ответы выделить.

Теплоизоляцион. материал	λ , Вт/м $^{\circ}$ С	Теплоизоляцион. материал	λ , Вт/м $^{\circ}$ С
Асбест пушенный	$0,13 + 0,00019t$	Минеральная вата	0,046
Асбозонолит	$0,143 + 0,00019t$	Новоасбозурит	$0,144 + 0,00014t$
Асбозурит	$0,1622 + 0,000169t$	Ньювель	$0,087 + 0,000064t$
Асбослюда	$0,12 + 0,000148t$	Пластикглас	0,184
Асботермит	$0,109 + 0,000145t$	Прессшпан	0,24
Вата	0,042	Пробковая плита	0,05
Войлок строит.	0,05	Резина	0,16
Гипс	0,43	Слюда	0,52
Зонолит	$0,072 + 0,000262t$	Совелит	$0,0901 + 0,000087t$
Карболит	0,231	Стекловата	0,055
Камышит	0,1	Текстолит	0,25
Картон	0,2	Фибролит	0,11
Льняная ткань	0,088	Шлаковата	$0,06 + 0,000145t$

Таблица 3.

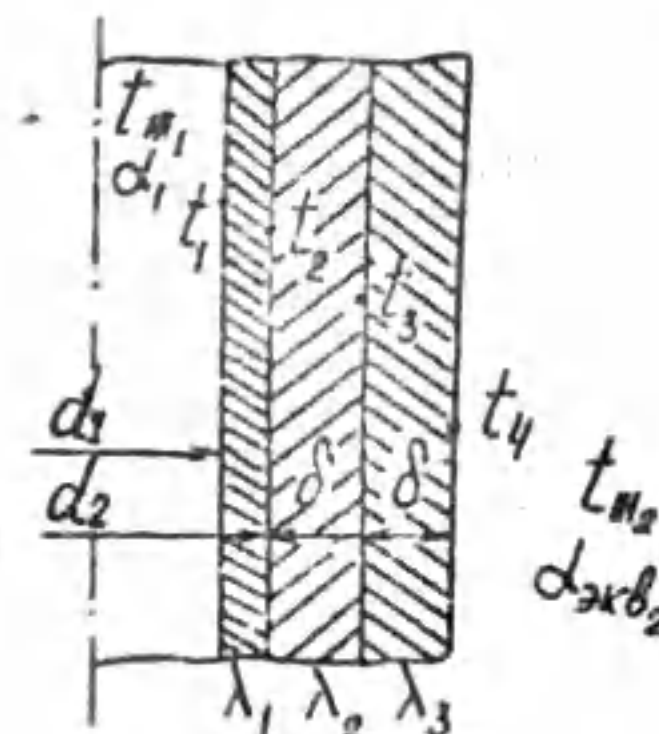
№ вар.	Исходные данные	Тепловая изоляция		Рассчитать
		δ_2	δ_3	
I	2	3	4	5
1	$t_{н1} = 280^{\circ}$ С	Асбозурит	Картон	$\alpha_{жв}, q, \delta_3, t_1, t_2, t_3, \lambda_{эф}, \delta_{ст}$
2	$\alpha_1 = 250$	Асбест пушен.	Гипс	Учесть теплоотдачу излучением с поверхности изоляции в окружающую среду (к воздуху). Степень черноты поверхности изоляции принять $\epsilon_{из} = 0,95$
3	$t_{н2} = 20^{\circ}$ С	Асботермит	Гипс	
4	$\alpha_2 = 13,69$	Зонолит	Слюда	
5	$t_4 = 50^{\circ}$ С	Новоасбозурит	Карболит	
6	$\delta_2 = 10$ мм $\delta_3 = 30$ мм $\lambda_1 = 50$	Асбослюда	Слюда	
7	$t_1 = 200^{\circ}$ С	Войлок строит.	Асбозонолит	$q, t_2, t_3, \lambda_{эф}, \delta_{ст}$
8	$t_4 = 30^{\circ}$ С	Ньювель	Текстолит	
9	$\delta_1 = 8$ мм	Фибролит	Совелит	
10	$\delta_2 = 20$ мм	Шлаковата	Вата	
11	$\delta_3 = 15$ мм	Мин. вата	Новоасбозурит	
12	$\lambda_1 = 45$	Асбослюда	Карболит	

Продолжение табл. 3.

1	2	3	4	5
13	$t_1 = 800^\circ\text{C}$	Резина	Пробк.плита	$d_{жкв}, q, t_2, t_3, t_4, \lambda_{жкв}, \delta_{см}$. Учесть теплоотдачу излучением с поверхности изоляции в окружающую среду (к воздуху). Степень черноты поверхности изоляции принять $\epsilon_{из} = 0,95$.
14	$\lambda_1 = 30$	Сибролит	Стекловата	
15	$t_{жкв} = 30^\circ\text{C}$	Мин. вата	Прессшпан	
16	$\delta_2 = 20$	Камышит	Плексиглас	
17	$d_1 - d_2 = 10\text{мм}$	Резина	Войлок строит.	
18	$\delta_3 = 10\text{мм}$	Сибролит	Льнян. ткань	
19	$t_{жкв} = 500^\circ\text{C}$	Асбест пуш.	Камышит	$d_{жкв}, q, t_2, t_3, \delta_2, \lambda_{жкв}, \delta_{см}$. Учесть теплоотдачу излучением через слой диатермичного газа с $t_{жкв}$ к стальной стенке, имеющей степень черноты $\epsilon_c = 0,45$.
20	$\alpha_1 = 34,66$	Плексиглас	Зонолит	
21	$t_1 = 480^\circ\text{C}$	Асбозурит	Льнян. ткань	
22	$t_2 = 60^\circ\text{C}$	Картон	Ньювель	
23	$\delta_1 = 15\text{мм}$	Асботермит	Резина	
24	$\delta_3 = 20\text{мм}$	Сибролит	Новоасбозурит	
	$\lambda_1 = 40$			
25	$t_{жкв} = 450^\circ\text{C}$	Асбест пуш.	Войлок стр.	$d_{жкв}, d_{жкв2}, q, t_2, t_3, t_4, \delta_3, \lambda_{жкв}, \delta_{см}$. Учесть теплоотдачу излучением на наружных поверхностях трехслойной стенки. Степень черноты поверхности изоляция принять $\epsilon_{из} = 0,95$, для стальной стенки $\epsilon_c = 0,4$
26	$\alpha_1 = 17,1$	Картон	Асбозурит	
27	$t_1 = 430^\circ\text{C}$	Асбослюда	Резина	
28	$t_{жкв} = 30^\circ\text{C}$	Текстолит	Шлаковата	
29	$\alpha_2 = 13,04$	Совелит	Прессшпан	
30	$\delta_1 = 5\text{мм}$	Сибролит	Асботермит	
	$\delta_2 = 30\text{мм}$			
	$\lambda_2 = 20$			

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБ

Задача № 3



По стальному трубопроводу ($\lambda_1 = 50 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$), покрытому двумя слоями тепловой изоляции одинаковой толщины δ , перекачивается горячий жидкий теплоноситель. Снаружи - спокойный воздух. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4 в следующих размерностях: $\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$, $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$, $t, ^\circ\text{C}$, $d, \text{мм}$, $\delta, \text{мм}$.

Величины, которые требуется рассчитать, указаны в таблице 5.

Таблица 4.

№ вар.	Исходные данные	d_1	d_2	λ_2	λ_3
1	$d_1 = 480$ $t_{жкв1} = 502,5$ $d_{жкв2} = 10$ $t_{жкв2} = 15$ $t_4 = 60$	103	109	0,204	0,0904
2	$\alpha_1 = 500$ $t_{жкв1} = 516,9$ $t_3 = 332$ $d_{жкв2} = 10$ $t_{жкв2} = 20$	153	159	0,204	0,090
3	$t_2 = 540,05$ $t_4 = 60$ $d_1 = 520$ $d_{жкв2} = 10$ $t_{жкв2} = 30$	169	175	0,242	0,0941
4	$t_2 = 547,7$ $t_3 = 368$ $t_{жкв1} = 549,3$ $\alpha_2 = 3,57$ $\delta = 70$	213	219	0,240	0,0933
5	$t_1 = 510,03$ $t_4 = 60$ $d_{жкв2} = 10$ $t_{жкв2} = 35$ $d_1 = 560$	239	245	0,181	0,0875
6	$t_2 = 540$ $t_4 = 60$ $d_1 = 580$ $t_{жкв1} = 541,3$ $t_{жкв2} = 30$	267	273	0,182	0,164
7	$d_1 = 600$ $t_{жкв1} = 501,3$ $t_2 = 500$ $t_4 = 60$ $d_{жкв2} = 10$	239	245	0,178	0,163
8	$t_4 = 60$ $d_{жкв2} = 10$ $t_{жкв2} = 15$ $t_2 = 450$ $t_{жкв1} = 451,7$	213	219	0,120	0,158
9	$d_1 = 500$ $t_{жкв1} = 401,8$ $t_1 = 400,05$ $t_4 = 60$ $d_{жкв2} = 10$	169	175	0,116	0,155

Продолжение табл. 4

№ вар.	Исходные данные	d_1	d_2	λ_2	λ_3
10	$t_2 = 500$ $t_4 = 60$ $\alpha_2 = 520$ $\alpha_2 = 3,72$ $\delta = 29,5$	153	159	0,126	0,052
11	$t_3 = 334,1$ $t_4 = 60$ $t_2 = 520$ $t_{m1} = 521,3$ $t_2 = 35$	103	109	0,128	0,052
12	$t_2 = 497,1$ $\alpha_1 = 560$ $t_{m1} = 498,4$ $\alpha_2 = 3,57$ $\delta = 40$	153	159	0,179	0,052
13	$\alpha_1 = 580$ $t_{m1} = 541,2$ $t_4 = 60$ $\alpha_2 = 3,42$ $\delta = 51$	169	175	0,187	0,052
14	$t_4 = 60$ $\alpha_2 = 4,0$ $t_1 = 515,05$ $\alpha_1 = 600$ $\delta = 31,5$	213	219	0,183	0,052
15	$t_1 = 540,05$ $t_3 = 262$ $\alpha_{\text{вн}} = 10$ $t_{m2} = 25$ $\alpha_1 = 480$	239	245	0,174	0,158
16	$t_2 = 500$ $t_4 = 60$ $t_1 = 500,05$ $\alpha_1 = 500$ $\alpha_{\text{вн}} = 10$	267	273	0,166	0,157
17	$t_3 = 187$ $t_1 = 430,04$ $\alpha_{\text{вн}} = 10$ $t_{m2} = 20$ $t_{m1} = 431,4$	239	245	0,108	0,157
18	$t_1 = 401,73$ $t_{m1} = 402,8$ $\alpha_1 = 540$ $t_4 = 60$ $t_{m2} = 30$	213	219	0,106	0,155
19	$t_1 = 510,046$ $t_2 = 510$ $t_3 = 226,6$ $t_{m1} = 511,4$ $t_{m2} = 35$	169	175	0,166	0,161
20	$t_2 = 510$ $t_3 = 315$ $t_4 = 60$ $\alpha_1 = 580$ $\alpha_{\text{вн}} = 10$	153	159	0,171	0,089
21	$t_4 = 60$ $t_3 = 279$ $\alpha_1 = 600$ $\alpha_{\text{вн}} = 10$ $t_{m2} = 35$	103	109	0,168	0,0883
22	$\alpha_2 = 3,57$ $\alpha_1 = 480$ $t_1 = 480,05$ $t_3 = 296$ $\delta = 50$	153	159	0,167	0,0875
23	$t_2 = 540$ $t_3 = 327$ $t_4 = 60$ $t_{m1} = 541,6$ $t_{m2} = 30$	169	175	0,170	0,0875
24	$t_{m1} = 521,7$ $t_{m2} = 15$ $\alpha_{\text{вн}} = 10$ $t_1 = 520,05$ $t_3 = 338$	213	219	0,179	0,0861

Продолжение табл. 4

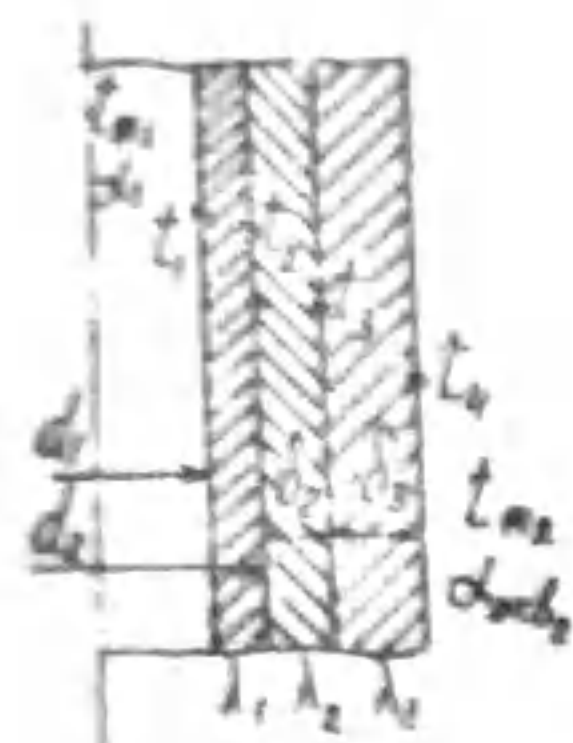
№ вар.	Исходные данные	d_1	d_2	λ_2	λ_3
25	$t_{m1} = 440,7$ $t_{m2} = 10$ $\alpha_2 = 510$ $t_1 = 438,57$ $t_4 = 60$	204	210	0,230	0,164
26	$t_1 = 510,03$ $t_4 = 60$ $\alpha_2 = 530$ $\alpha_{\text{вн}} = 10$ $t_{m2} = 35$	184	190	0,237	0,052
27	$\alpha_1 = 550$ $\alpha_2 = 3,57$ $\delta = 42$ $t_2 = 450$ $t_3 = 259$	174	180	0,122	0,0854
28	$t_2 = 500$ $t_4 = 60$ $\alpha_1 = 570$ $t_{m1} = 501,6$ $t_{m2} = 20$	154	160	0,123	0,160
29	$t_{m1} = 502,5$ $t_1 = 500,07$ $t_4 = 60$ $\alpha_{\text{вн}} = 10$ $t_{m2} = 15$	103	109	0,204	0,0904
30	$\alpha_1 = 500$ $\alpha_2 = 3,72$ $\delta = 52,5$ $t_1 = 515,05$ $t_3 = 332$	153	159	0,201	0,090

Таблица 5

α_1	t_{m1}	t_1	t_2	t_3	t_4	$\alpha_{\text{вн}}$	t_{m2}	α_1	δ	Q
$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	°C	°C	°C	°C	°C	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	°C	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	мм	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$

В таблице 5 обведите кружком величины, данные в условии Вашего варианта задачи, например, для варианта I: α_1 , t_{m1} , $\alpha_{\text{вн}}$, t_{m2} , t_4 .
 α_1 - лучистая составляющая теплоотдачи с поверхности теплоизолированного трубопровода. При расчетах α_1 принять степень черноты поверхности изоляции $\epsilon_c = 0,9$.

Задача 4



Стальной трубопровод горячей воды покрыт двумя слоями тепловой изоляции толщиной δ_2 и δ_3 и находится на открытом воздухе.

Средняя температура горячей воды $t_{m1} = 90^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = 350 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Внутренний и наружный диаметры трубопровода $d_1 = 260 \text{ мм}$, $d_2 = 268 \text{ мм}$, коэффициент теплопроводности стали $\lambda_1 = 50 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$.

Дополнительные исходные данные по вариантам приведены в таблице 6 в размерностях: $\delta, \text{мм}$, $t, ^\circ\text{C}$, $\alpha_{жк2}, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $\lambda, \text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$.

Рассчитать наружный диаметр теплоизолированного трубопровода и теплопотери в окружающую среду с 1 м длины трубы ($Q, \text{Вт/м}$).

На сколько градусов снизится температура горячей воды (Δt_p) на участке трубопровода длиной $l = 500 \text{ м}$, если скорость воды $w = 0,5 \text{ м/с}$?

Ответы выделить.

Таблица 6.

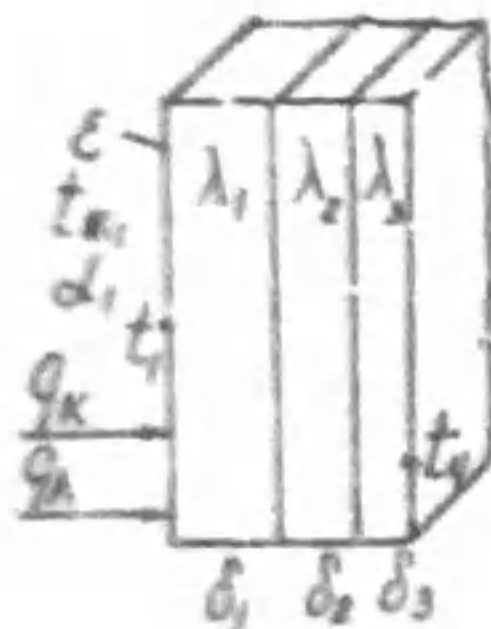
№ вар.	Дополнительные исходные данные				
1	$\delta_2 = 36$ $\lambda_3 = 0,0904$	$t_4 = 16,2$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,204$
2	$\delta_3 = 52$ $\lambda_3 = 0,09$	$t_3 = 69,1$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,242$
3	$t_2 = 89,475$ $\lambda_2 = 0,304$	$\delta_2 = 51$ $\lambda_3 = 0,0941$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	
4	$t_4 = 21,9$ $\lambda_2 = 0,24$	$\delta_3 = 49$ $\lambda_3 = 0,183$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	
5	$t_1 = 89,62$ $\lambda_2 = 0,381$	$\delta_2 = 48$ $\lambda_3 = 0,0675$	$\alpha_{жк2} = 12$	$t_{m2} = 10$	
6	$t_3 = 49,5$ $\lambda_2 = 0,178$	$\delta_3 = 65$ $\lambda_3 = 0,164$	$\alpha_{жк2} = 12$	$t_{m2} = 10$	
7	$t_2 = 89,274$ $\lambda_3 = 0,463$	$\delta_3 = 31$	$t_4 = 22,5$	$\lambda_2 = 0,182$	

Продолжение табл. 6

№ вар.	Дополнительные исходные данные				
8	$t_3 = 45,4$ $\lambda_3 = 0,158$	$\delta_2 = 55$	$t_4 = 20,8$	$\lambda_2 = 0,22$	
9	$t_3 = 39$ $\lambda_3 = 0,255$	$\delta_3 = 57$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,116$
10	$t_4 = 18,1$ $\lambda_3 = 0,082$	$\delta_3 = 41$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,226$
11	$t_3 = 64,2$ $\lambda_3 = 0,182$	$\delta_2 = 32$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,228$
12	$t_3 = 53,5$	$t_4 = 18,4$	$\delta_2 = 63$	$\lambda_2 = 0,279$	$\lambda_3 = 0,20$
13	$t_3 = 58,5$ $\lambda_3 = 0,11$	$\delta_2 = 54$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,287$
14	$t_3 = 72,0$ $\lambda_3 = 0,073$	$\delta_3 = 52$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,283$
15	$t_4 = 20,8$ $\lambda_3 = 0,158$	$\delta_2 = 37$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,374$
16	$t_4 = 22,8$ $\lambda_3 = 0,157$	$\delta_3 = 33$	$\alpha_{жк2} = 12$	$t_{m2} = 10$	$\lambda_2 = 0,266$
17	$t_1 = 89,29$	$\delta_2 = 33$	$t_4 = 23,0$	$\lambda_2 = 0,508$	$\lambda_3 = 0,132$
18	$t_2 = 89,553$ $\lambda_3 = 0,355$	$\delta_2 = 53$	$t_4 = 17,4$	$\lambda_2 = 0,106$	
19	$t_3 = 40,8$	$\delta_2 = 52$	$t_4 = 18,9$	$\lambda_2 = 0,166$	$\lambda_3 = 0,261$
20	$t_1 = 89,606$	$\delta_3 = 54$	$t_4 = 16,0$	$\lambda_2 = 0,271$	$\lambda_3 = 0,089$
21	$t_2 = 89,422$	$\delta_3 = 29$	$t_4 = 19,65$	$\lambda_2 = 0,268$	$\lambda_3 = 0,1$
22	$t_3 = 65,6$	$\delta_3 = 63$	$t_4 = 18,6$	$\lambda_2 = 0,267$	$\lambda_3 = 0,16$
23	$t_1 = 89,206$ $\lambda_3 = 0,18$	$\delta_2 = 57$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,370$
24	$t_2 = 89,623$ $\lambda_3 = 0,0875$	$\delta_2 = 60$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{жк2} = 12$	$\lambda_2 = 0,179$

№	Дополнительные исходные данные				
25	$t_1 = 58,5$ $\lambda_2 = 0,0861$	$d_2 = 65$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{вод2} = 12$	$\lambda_2 = 0,33$
26	$t_1 = 16,6$ $\lambda_2 = 0,237$	$d_2 = 64$ $\lambda_3 = 0,072$	$t_{m2} = 10$	$\alpha_{вод2} = 12$	
27	$t_1 = 09,585$ $\lambda_2 = 0,222$	$d_3 = 48$ $\lambda_3 = 0,095$	$\alpha_{вод2} = 12$	$t_{m2} = 10$	
28	$t_1 = 89,376$ $\lambda_2 = 0,223$	$d_3 = 42$ $\lambda_3 = 0,16$	$\alpha_{вод2} = 12$	$t_{m2} = 10$	
29	$t_1 = 31,1$ $\lambda_2 = 0,156$	$d_3 = 25$ $\lambda_3 = 0,4$	$\alpha_{вод2} = 12$	$t_{m2} = 10$	
30	$t_1 = 19,6$ $\lambda_2 = 0,28$	$d_3 = 29$ $\lambda_3 = 0,095$	$\alpha_{вод2} = 12$	$t_{m2} = 10$	

РАСЧЕТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ



Задача № 5-1

Дано: $t_{m1} = 70^\circ\text{C}$, $\alpha_2 = 60 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $\epsilon = 0,6$,
 $t_1 = 50^\circ\text{C}$, $\lambda_1 = 200 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, $\lambda_3 = 30 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$,
 $t_2 = 0^\circ\text{C}$, $\delta_1 = 30 \text{ см}$, $\delta_2 = 25 \text{ см}$, $\delta_3 = 15 \text{ см}$.
 Найти: q , Вт/м^2 , λ_2 .

Задача № 5-2

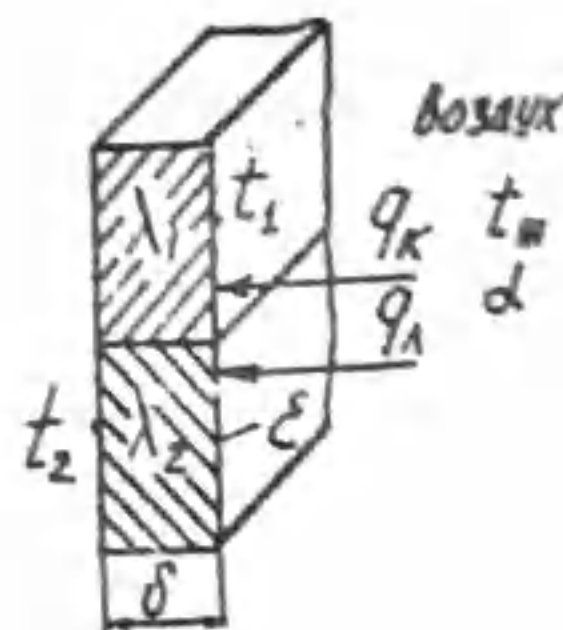
Плоская поверхность покрыта слоем тепловой изоляции толщиной 4 см с коэффициентом теплопроводности $0,5 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$. Температура поверхности под изоляцией 50°C , на поверхности изоляции 50°C .

Поверхность изоляции омывается жидкостью с температурой 20°C . Рассчитать плотность теплового потока через изоляцию и коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к жидкости.

Какие материалы имеют такой коэффициент теплопроводности?

Какая температура в центре изоляционного слоя?

Задача № 5-3



Дано: $\lambda_1 = 56 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, $\lambda_2 = 52 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$,
 $t_m = 150^\circ\text{C}$, $\alpha = 5 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $t_2 = 20^\circ\text{C}$,
 $\delta = 40 \text{ см}$, $\epsilon = 0,9$.

Рассчитать температуру поверхности t_1 конвективный (q_k) и лучистый (q_r) потоки теплоты.

Задача № 5-4

Вода при атмосферном давлении кипит на поверхности кипятильника при $t_m = 100^\circ\text{C}$. Мощность кипятильника 600 Вт, наружный диаметр $d = 8 \text{ мм}$, длина рабочей части трубки $l = 0,6 \text{ м}$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности трубки к воде $\alpha = 5630 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Какова температура поверхности трубки? Как изменится температура поверхности, если в результате длительного пользования на поверхности трубки образуется накипь толщиной $\delta_n = 0,5 \text{ мм}$, $\lambda_n = 0,8 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$?

Какова температура на поверхности накипи? Перепад температур в слое накипи?

Задача № 5-5

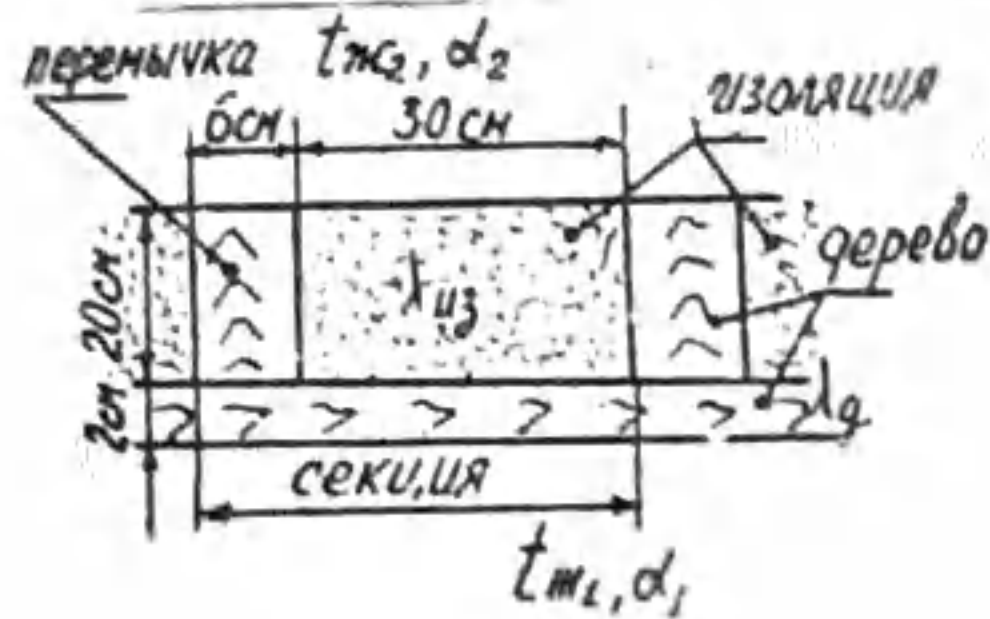
Воздух с температурой 20°C омывает верхнюю поверхность горизонтальной плиты из железа ($\lambda = 50 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$) толщиной 10 см. Коэффициент конвективной теплоотдачи между поверхностью и воздухом составляет $20 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. К этой же поверхности подводится лучистый тепловой поток 350 Вт/м^2 . От нижней поверхности в окружающую среду отводится тепловой поток плотностью 200 Вт/м^2 .

Каковы температуры на поверхностях железной плиты?

Задача № 5-6

Найти толщину слоя шлаковаты ($\lambda = 0,16 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$), которой надо теплоизолировать плоскую стенку так, чтобы уменьшить потери теплоты в 2 раза по сравнению с неизолированной стенкой. Температуру наружной поверхности стенки до и после наложения теплоизоляции принять постоянной. Коэффициент теплоотдачи в обоих случаях равен $10 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Задача № 5-7



На рисунке показано сечение потолка сельского жилого дома.
 Дано: $\lambda_{из} = 0,05 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\lambda_{д} = 0,15 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $t_{м1} = 20 \text{°C}$, $t_{м2} = -20 \text{°C}$, $\alpha_1 = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $\alpha_2 = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$.

Рассчитать тепловой поток через одну секцию потолка. Расчеты произвести на 1 м длины секции.

Задача № 5-8

Паропровод из титана ($\lambda = 15 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) диаметром 57x64 мм и длиной $l = 50 \text{ м}$ имеет на внутренней поверхности температуру 160°C . Теплота в окружающую среду с температурой 25°C от наружной поверхности трубопровода передается конвекцией и излучением. Степень черноты поверхности трубы $\xi = 0,9$, коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$.

Рассчитать теплотери трубопровода и перепад температур по толщине стенки труб.

Задача № 5-9

Наружную поверхность обмуровки топочной камеры с температурой 200°C и стальную обшивку толщиной 5 мм ($\lambda = 40 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) разделяет воздушный зазор толщиной 2 см ($\lambda_{в} = 0,02 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$).

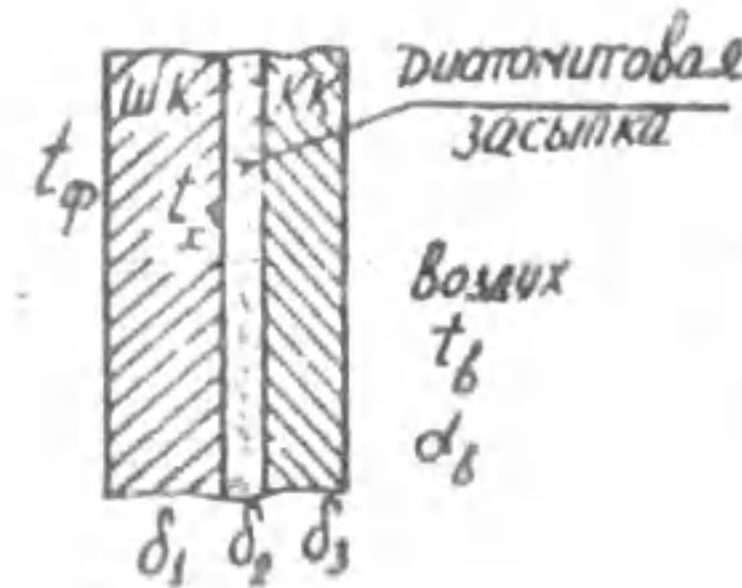
Температура на наружной поверхности стальной обшивки 30°C .

Принять, что теплота через воздушный зазор от обмуровки к стальной обшивке передается теплопроводностью и излучением. Степени черноты обмуровки и стали равны соответственно 0,96 и 0,9.

Рассчитать теплотери через 1 м² поверхности и перепад температур в стальной обшивке.

Задача № 5-10

Обмуровка печи состоит из трех слоев: шамотного кирпича ($\delta_1 = 120 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 0,9 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$), диатомитовой засыпки ($\delta_2 = 50 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 0,13 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) и красного кирпича ($\delta_3 = 250 \text{ мм}$, $\lambda_3 = 0,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$). Температура джекла в печи 1100°C , температура воздуха $t_{в} = 25 \text{°C}$, $\alpha_2 = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $t_x = 357 \text{°C}$.



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

Задача № 5-11

Стенка топочной камеры парового котла выполнена из слоя пеношамота толщиной $\delta_1 = 125 \text{ мм}$ ($\lambda_1 = 0,28 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) и слоя красного кирпича толщиной $\delta_2 = 50 \text{ мм}$ ($\lambda_2 = 0,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$). Температура на поверхности кирпича со стороны воздуха в помещении цеха равна 75°C . Температура воздуха 25°C , коэффициент теплоотдачи от поверхности кирпича к воздуху $10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, степень черноты поверхности кирпича 0,9.

Рассчитать теплотери с 1 м² поверхности кирпича, учесть теплоотдачу к воздуху излучением.

Определить перепады температур в слое пеношамота и в слое кирпича. Какова температура пеношамота со стороны топочного объема?

Задача № 5-12

Паропровод с наружным диаметром 100 мм и температурой поверхности 300°C покрывается слоем изоляции толщиной 80 мм и теплопроводностью $\lambda = 0,14 + 0,0016 t \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, температура окружающей среды $t_{с} = 25 \text{°C}$.

Найти потери теплоты через изоляцию при длине паропровода $l = 15 \text{ м}$. Учесть теплоотдачу излучением с поверхности изоляции ($\xi_{из} = 0,95$). Какова температура на поверхности изоляции?

Задача № 5-13

Паропровод наружным диаметром 80 мм с температурой поверхности 160°C покрывается слоем минеральной ваты толщиной 50 мм. Коэффициент теплопроводности ваты $\lambda = 0,05 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, степень черноты $\xi = 0,9$. Найти суточную потерю теплоты за счет конвекции и излучения с поверхности теплоизолированного трубопровода длиной 30 м, если температура окружающего воздуха 25°C , а коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$.

Какова температура на поверхности изоляции?

Задача № 5-14

Отопленный электр-провод диаметром 2 мм имеет на поверхности температуру 90°C и коэффициент теплоотдачи $\alpha = 22 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$. Температура окружающего воздуха 18°C . Когда провод покрыли резиновой изоляцией ($\lambda_{из} = 0,16 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$) толщиной 3 мм, коэффициент теплоотдачи уменьшился в 2 раза. Какая температура будет теперь на поверхности провода? На поверхности изоляции? Электрическая мощность остается неизменной.

Задача № 5-15

Стальной трубопровод диаметром 200x216 мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 40 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$ проложен на открытом воздухе, температура которого равна -17°C . По трубе передается горячая вода со средней температурой 90°C . Коэффициент теплоотдачи от воды к трубе $\alpha_1 = 800 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$. Тепло от трубы к воздуху передается излучением и конвекцией. Длина трубопровода 23 м, коэффициент теплоотдачи от трубы к воздуху $\alpha_2 = 9 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, степень черноты поверхности трубы $\epsilon = 0,9$.

Определить теплопотери трубопровода и перепад температур по толщине стенки трубы.

Задача № 5-16

В цех из котельной подают горячую воду по стальной трубе ($\lambda = 40 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$) диаметром 58x65 мм, длиной $\ell = 120 \text{ м}$ со скоростью $1,2 \text{ м/с}$. Температура воды на входе в трубу 90°C , на выходе из трубы 88°C . Коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности трубы $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$. Теплоемкость воды $c = 4,18 \text{ кДж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$. Труба теплоизолирована, толщина тепловой изоляции $\delta_{из} = 21 \text{ мм}$, температура окружающего воздуха 2°C , коэффициент теплоотдачи $\alpha_2 = 35 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$. Тепло от поверхности изоляции ($\epsilon_{из} = 0,9$) передается конвекцией и излучением.

Рассчитать:

1. Расход воды в кг/с;
2. Теплоотдачу, отводимую от воды (теплопотери трубопровода);
3. Эквивалентный коэффициент теплоотдачи к воздуху;
4. Коэффициент теплопроводности изоляции.

Задача № 5-17

Паропровод из титана ($\lambda = 15 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$) диаметром 57x64 мм и длиной 50 м имеет температуру внутренней поверхности 160°C . Его необходимо теплоизолировать. При этом суточная потеря теплоты не долж-

на превышать 941 кДж. Теплоизоляционный материал - вермикулит ($\lambda = 0,33 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$). Температура окружающего воздуха 25°C . Тепло с поверхности изоляции передается излучением и конвекцией. Коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, степень черноты вермикулита $\epsilon = 0,9$.

Рассчитать толщину слоя изоляции и температуру на наружной поверхности изоляции.

Задача № 5-18

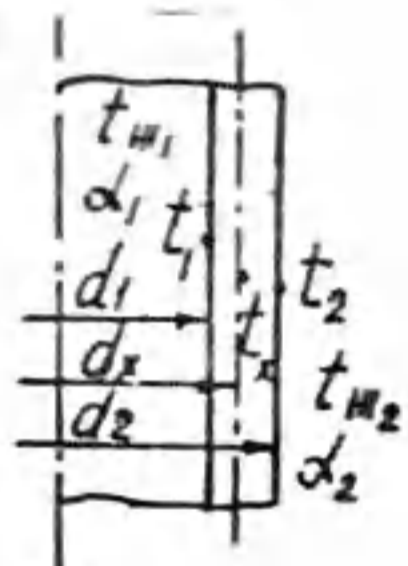
В установке для тепловой переработки нефти нефтепродукты передаются по титановой трубе ($\lambda = 15 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$) диаметром 118x126 мм со средней температурой 350°C , коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = 300 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$. Снаружи труба обогревается излучением от ленточных нагревателей и конвекцией от газов, имеющих среднюю температуру 1400°C . Коэффициент конвективной теплоотдачи к наружной поверхности трубы $\alpha_2 = 100 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, степень черноты поверхности $\epsilon = 0,96$.

Рассчитать передаваемую теплоту Q , Вт/м, температуру на наружной поверхности трубы, перепад температур по толщине стенки трубы.

Задача № 5-19

Рассчитать количество тепла, теряемое стальной трубой ($\lambda = 50 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$) длиной $\ell = 2,5 \text{ м}$ за 1 час, а также температуры на поверхностях труб в слое с $d_1 = 80 \text{ мм}$.

Дано: $t_{м1} = 800^{\circ}\text{C}$, $\alpha_1 = 35 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, $t_{м2} = 20^{\circ}\text{C}$, $\alpha_2 = 6 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, $d_1 = 50 \text{ мм}$, $d_2 = 110 \text{ мм}$.



Задача № 5-20

По теплоизолированному стальному ($\lambda = 50 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$) паропроводу передается насыщенный пар с температурой 235°C . Внутренний и наружный диаметры труб $d_1 = 100 \text{ мм}$, $d_2 = 108 \text{ мм}$, толщина тепловой изоляции $\delta_{из} = 80 \text{ мм}$ ($\lambda_{из} = 0,06 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$), степень черноты поверхности изоляции $\epsilon = 0,9$.

Теплота с поверхности теплоизолированной трубы к окружающему воздуху с $t_{м} = 25^{\circ}\text{C}$ передается излучением и конвекцией. Коэффициенты конвективной теплоотдачи от пара к поверхности $465 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, от поверхности изоляции к воздуху $6 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Рассчитать теплопотери Q , Вт/м, температуру на наружной поверх-

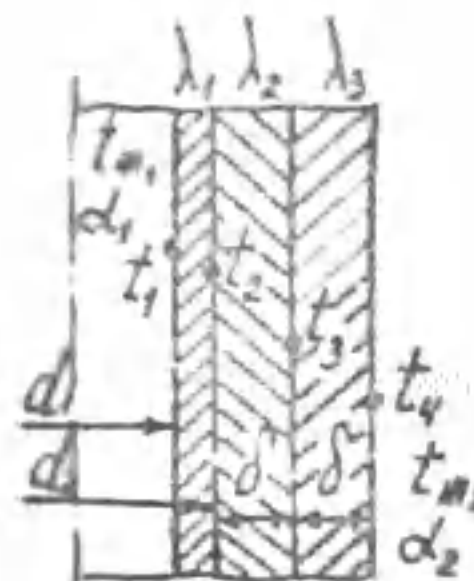
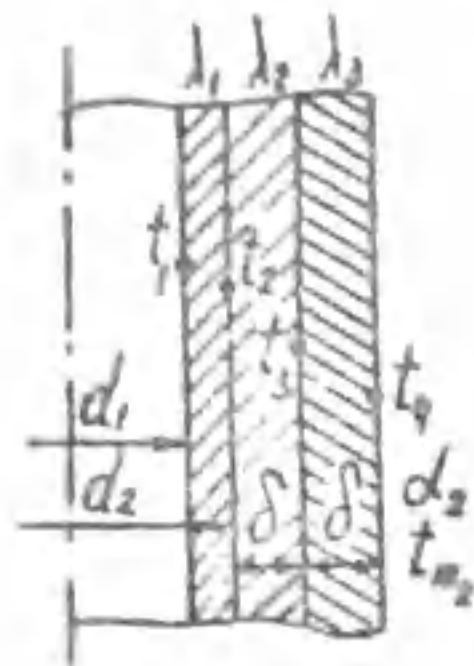
ности изоляции, максимальную температуру слоя изоляции.

Задача № 5-21

Стальной трубопровод ($\lambda = 50 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) имеет два слоя тепловой изоляции одинаковой толщины δ .

Дано: $d_1 = 154 \text{ мм}$, $d_2 = 160 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 0,123 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $t_{m1} = 501,6 \text{ °C}$, $\alpha_1 = 570 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $t_{m2} = 20 \text{ °C}$, $t_2 = 500 \text{ °C}$, $t_4 = 60 \text{ °C}$, $\lambda_3 = 0,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$.

Рассчитать: $Q, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, δ , d_2 , t_1 , t_3



Задача № 5-22

Стальной трубопровод ($\lambda_1 = 50 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) имеет два слоя тепловой изоляции одинаковой толщины δ .

Дано: $d_1 = 184 \text{ мм}$, $d_2 = 190 \text{ мм}$, $t_1 = 510,03 \text{ °C}$, $t_4 = 60 \text{ °C}$, $\alpha_1 = 530 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $\alpha_2 = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $t_{m2} = 35 \text{ °C}$, $\lambda_2 = 0,237 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\lambda_3 = 0,052 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$.

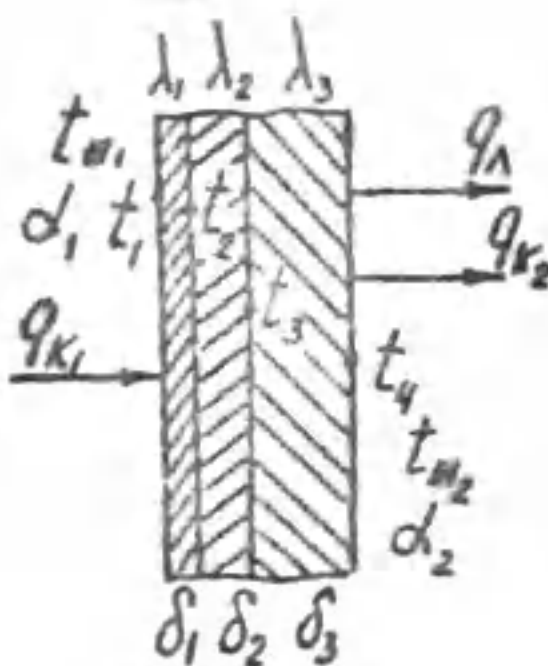
Рассчитать: $Q, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, δ , t_{m1} , t_2 , t_3 .

Задача № 5-23

Стальная стенка толщиной δ_1 покрыта двумя слоями тепловой изоляции толщиной δ_2 и δ_3 .

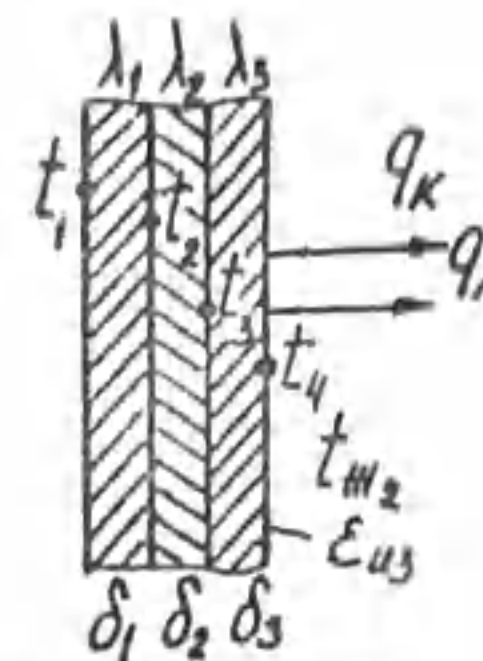
Дано: $t_{m1} = 280 \text{ °C}$, $\alpha_1 = 250 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $t_{m2} = 20 \text{ °C}$, $\alpha_2 = 13,69 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $t_4 = 50 \text{ °C}$, $\delta_1 = 10 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 50 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\delta_2 = 30 \text{ мм}$, $\epsilon_{u1} = 0,95$, $\lambda_2 = 0,2 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\lambda_3 = 0,1622 + 0,000169 t$, $\text{Вт/м} \cdot \text{°C}$.

Рассчитать: $\alpha_{экв1}$, q , δ_3 , t_1 , t_2 , t_3 , эффективный коэффициент теплопроводности двухслойной изоляции ($\lambda_{эф}$).



Задача № 5-24

Стальная стенка толщиной δ_1 покрыта двумя слоями тепловой изоляции толщиной δ_2 и δ_3 .



Дано: $t_1 = 800 \text{ °C}$, $\lambda_1 = 30 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\epsilon_{u3} = 0,95$, $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 10 \text{ мм}$, $t_3 = 637,4 \text{ °C}$, $t_{m2} = 30 \text{ °C}$, $\lambda_2 = 0,144 + 0,00014 t$, $\text{Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\lambda_3 = 0,07 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$.

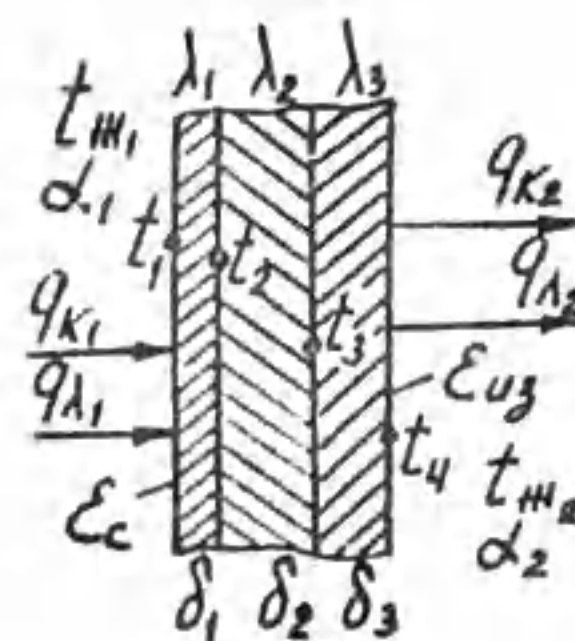
Рассчитать: q , t_2 , t_4 , q_n , q_k , конвективную составляющую коэффициента теплоотдачи α_2 , эффективную теплопроводность двухслойной изоляции $\lambda_{эф}$.

Задача № 5-25

Стальная стенка толщиной δ_1 покрыта двумя слоями тепловой изоляции толщиной δ_2 и δ_3 .

Дано: $t_{m1} = 450 \text{ °C}$, $\alpha_1 = 17,1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $t_1 = 430 \text{ °C}$, $t_{m2} = 20 \text{ °C}$, $\alpha_2 = 13,04 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $\delta_1 = 5 \text{ мм}$, $\delta_2 = 30 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 20 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\lambda_2 = 0,13 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\epsilon_c = 0,4$, $\lambda_3 = 0,06 + 0,000145 t$, $\text{Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\epsilon_{u1} = 0,95$.

Рассчитать: $\alpha_{экв1}$, q , t_2 , t_3 , t_4 , δ_3 , $\alpha_{экв2}$.

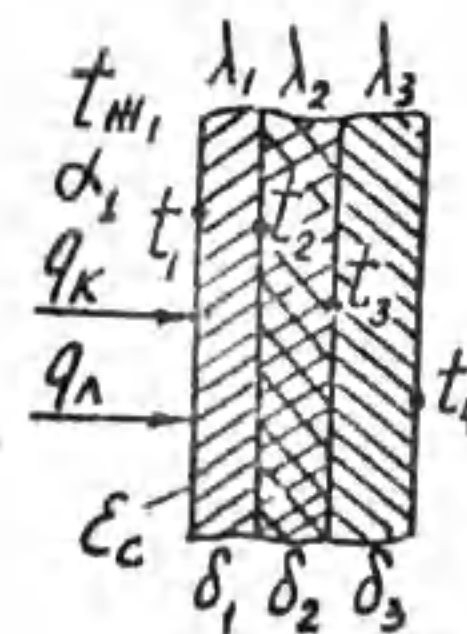


Задача № 5-26

Стальная стенка толщиной δ_1 покрыта двумя слоями тепловой изоляции толщиной δ_2 и δ_3 .

Дано: $t_{m1} = 500 \text{ °C}$, $\alpha_1 = 34,66 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, $t_3 = 380 \text{ °C}$, $t_4 = 60 \text{ °C}$, $\delta_1 = 15 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 40 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\delta_2 = 20 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 0,16 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\lambda_3 = 0,06 + 0,000145 t$, $\text{Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\epsilon_c = 0,45$.

Рассчитать: $\alpha_{экв1}$, q , t_1 , t_2 , δ_3 , эффективную теплопроводность двухслойной изоляции $\lambda_{эф}$.

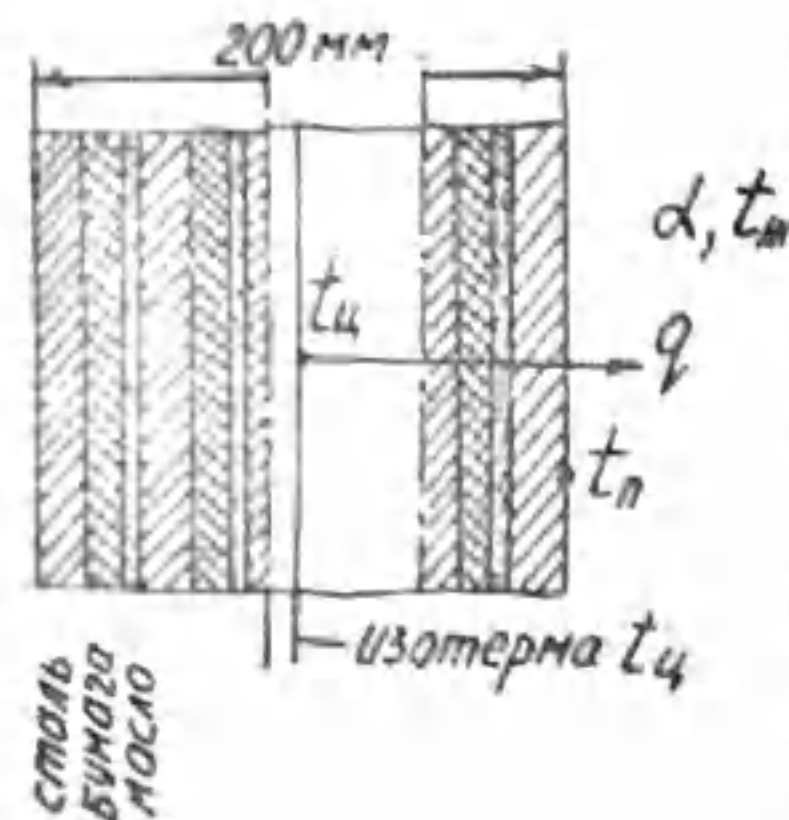


Задача № 5-27

Прямоугольный провод трансформатора имеет пропитанную бумажную изоляцию. Плотность теплового потока через изоляцию $q = 500 \text{ Вт/м}^2$. Толщина изоляции $\delta = 0,4 \text{ мм}$, $\lambda = 0,16 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $\epsilon = 0,93$.

Коэффициент конвективной теплоотдачи от бумажной изоляции $\alpha = 14 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$. Температура окружающего воздуха $t_{\text{в}} = 20 \text{°С}$. Определить температуру на поверхности изоляции и перепад температуры по толщине изоляции. Учесть теплоотдачу излучением.

Задача № 5-28



Сердечник трансформатора набран из листов трансформаторной стали толщиной $\delta_1 = 0,35 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 20 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$, между которыми находится бумажная изоляция толщиной $\delta_2 = 20 \text{ мкм}$, $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$. Пакет шириной 200 мм погружен в трансформаторное масло с $t_{\text{м}} = 40 \text{°С}$, $\alpha = 158 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$.

Не смотря на то, что пакет спрессован под большим давлением, между бумажной изоляцией и смазным стальным листом имеется тонкая пленка масла толщиной $\delta_3 = 1 \text{ мкм}$, $\lambda_3 = 0,1 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$. Температура в центре пакета $t_4 = 120 \text{°С}$.

Рассчитать эффективную теплопроводность и плотность теплового потока поперек листов пакета, а также температуру на поверхности пакета.

Задача № 5-29

Стенка трансформатора толщиной $\delta = 3 \text{ мм}$, $\lambda = 60 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$ с одной стороны соприкасается с трансформаторным маслом ($\alpha_1 = 90 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$, $t_{\text{м}1} = 95 \text{°С}$), с другой стороны охлаждается воздухом ($\alpha_2 = 13 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$, $t_{\text{в}2} = 20 \text{°С}$). Степень черноты поверхности стенки $\epsilon = 0,9$. Рассчитать плотность теплового потока через стенку, температуры на поверхностях стенки.

Учесть теплоотдачу излучением со стороны воздуха.

Задача № 5-30

Цилиндрический проводник из никелевой стали радиусом $r = 1 \text{ см}$, имеет удельное электрическое сопротивление $\rho = \frac{1}{1,3} \cdot \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$. По проводнику проходит постоянный ток $I = 227 \text{ А}$.

Проводник опрессован гетинаксовым цилиндром радиусом $r_2 = 2 \text{ см}$, $\lambda = 0,2 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$.

Чему равен перепад температуры по толщине гетинаксовой трубки?

Какова температура на наружной поверхности трубки, если температура воздуха 20°С , конвективный коэффициент теплоотдачи $\alpha = 11,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$, степень черноты поверхности трубки $\epsilon = 0,9$. Учесть теплоотдачу излучением.

Л и т е р а т у р а

1. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. - М.: Энергоиздат, 1981.
2. Теплотехника. Под ред. А.П.Баскакова. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.: Энергия, 1977.
4. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. - М.: Энергия, 1980.
5. Ф.Крейт, У.Блак. Основы теплопередачи. - М.: Мир, 1983.

Методические указания и задачи для самостоятельной работы студентов

Составитель Коновалова Лидия Степановна

Подписано к печати 04.02.94

Формат 60x84/16. Бумага писчая № 2.

Плоская печать. Усл.печ.л. 1,92. Уч.-изд.л. 1,74.

Тираж 150 экз. Заказ 9,5. Бесплатно.

Ротапринт ТПУ. 634004, Томск, пр. Ленина, 30.

Студенческое задание и задачи для самостоятельной работы по курсу
 "Теплотехника" для студентов теплотехнических специальностей.
 1984 г. Изд. 1984 - 14 с.

Составитель Киселева Л.С.

Рецензент доц. в.т.н. Курбан А.В.

Материалы указаны рассмотрены и рекомендованы методическим
 советом факультета теоретической и общей теплотехники 24 июня
 1984 года.

в.т.н. Курбан



В.А. Загородов

ТЕПЛОТДАЧА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

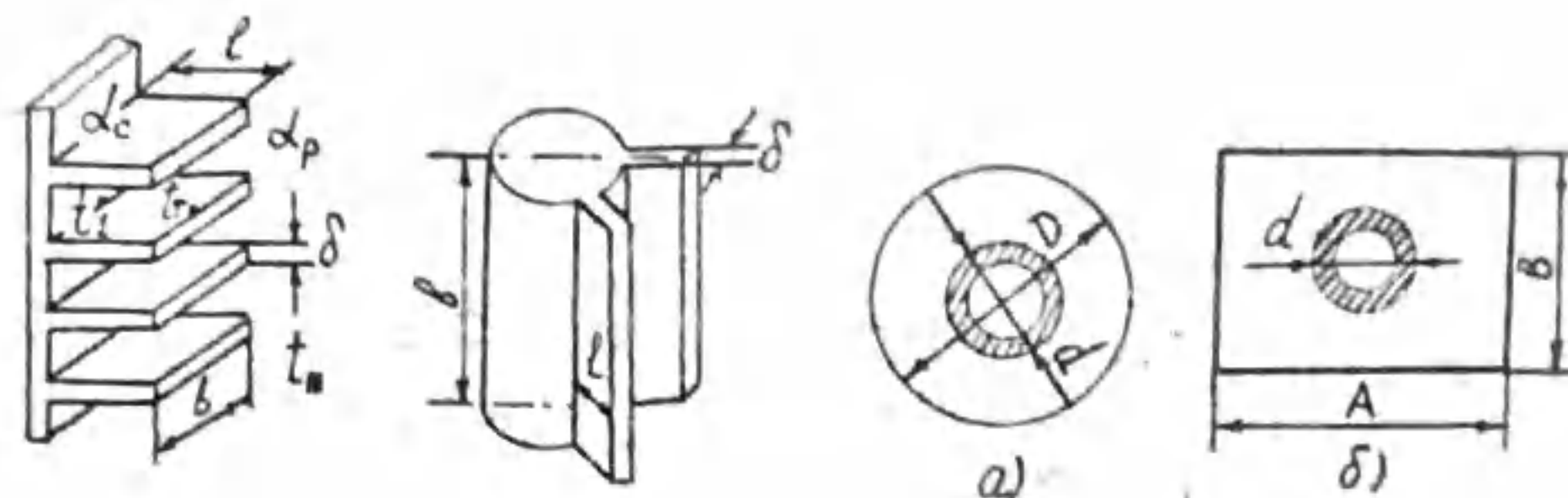


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 3

Условные обозначения: l, b, δ - соответственно длина, ширина и толщина ребра, P - периметр ребра, f - поперечное сечение ребра, Q_p - теплоотдача ребра, Q_c - теплоотдача межреберной поверхности, n - число ребер, α_p, α_c - соответственно коэффициенты теплоотдачи от ребер и от межреберной поверхности, F_p - площадь поверхности охлаждения ребра, F_c - площадь межреберной поверхности охлаждения, E - коэффициент эффективности ребра, $\vartheta_1 = t_1 - t_m$ - перегрев основания ребра, $\vartheta_r = t_r - t_m$ - перегрев торца ребра, D - диаметр круглого ребра, d - наружный диаметр трубы, A, B - размеры прямоугольного поперечного ребра на трубе, причем A - больший размер, $th(ml), ch(ml)$ - тригонометрические функции (гиперболический тангенс и косинус).

Теплоотдача любых оребренных поверхностей рассчитывается по формулам

$$Q = nQ_p + Q_c, \quad (1)$$

$$Q_c = \alpha_c F_c \vartheta_1. \quad (2)$$

Для прямых ребер на пластине и прямых продольных ребер на трубе (рис. 1, 2)

$$Q_p = \lambda f \vartheta_1 th(ml)$$

или

$$Q_p = \alpha_p F_p \vartheta_1 E,$$

где $E = \frac{th(ml)}{ml}$, $m = \sqrt{\frac{\alpha_p P}{\lambda \delta}}$, $f = bl$. (3)

При $P \approx 2b$ $m = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda \delta}}$.

Перегрев торца ребра

$$\vartheta_T = \frac{\vartheta_1}{ch(ml)}$$

Для круглых поперечных ребер на трубе (рис. 3а)

$Q_p = \alpha_p F_p \vartheta_1 E$, $E = \frac{th(ml)}{ml}$, $m = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda \delta}}$, (4)

$$l' = \frac{2-d}{2} (1 + 0,35 \ln \frac{D}{d}), \quad \vartheta_T = \frac{\vartheta_1}{ch(ml')}$$

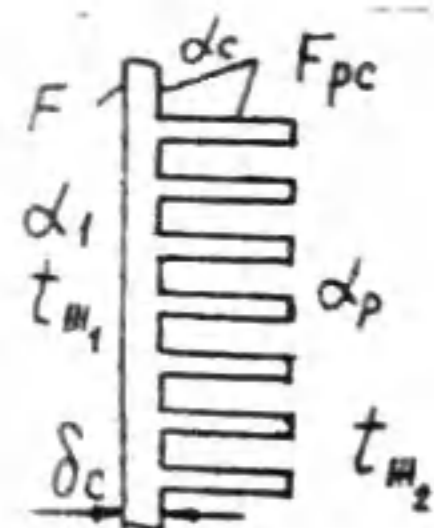
Для прямоугольных поперечных ребер на трубе (рис. 3б)

$Q_p = \alpha_p F_p \vartheta_1 E$, $E = \frac{th(ml'')}{ml''}$, $m = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda \delta}}$, (5)

$$l'' = 0,5d(p-1)(1 + 0,35 \ln p), \quad p = 1,28 \frac{b}{d} \sqrt{\frac{A}{b} - 0,2}, \quad \vartheta_T = \frac{\vartheta_1}{ch(ml'')}$$

Теплопередача

Теплопередача (рис. 4) через плоскую оребренную поверхность рассчитывается по формуле



$$Q = \frac{t_{m1} - t_{m2}}{\frac{1}{\alpha_1 F} + \frac{\delta_c}{\lambda F} + \frac{1}{\alpha_{np} F_{pc}}}$$

через оребренную стенку труб

$$Q = \frac{t_{m1} - t_{m2}}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{1}{2\pi l \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{np} F_{pc}}}$$

где $\alpha_{np} = \alpha_p \left(\frac{n F_p}{F_{pc}} E \psi + \frac{F_c}{F_{pc}} \right)$ - приведенный коэффициент теплоотдачи, $\psi = 0,85$ - коэффициент, учитывающий неравномерность температур по длине ребра.

ЗАДАЧИ

Задача № I-I

Труба с поперечными ребрами омывается продуктами сгорания топлива. Наружный диаметр трубы $d = 80$ мм, длина трубы $l_{tr} = 4$ м, толщина ребер $\delta_p = 5$ мм, количество ребер $n = 200$. Температура наружной поверхности трубы $t_c = 200^\circ\text{C}$, средняя температура продуктов сгорания $t_m = 480^\circ\text{C}$, коэффициенты теплоотдачи от ребер $\alpha_p = 30$ Вт/м²·°С, от межреберной поверхности $\alpha_c = 40$ Вт/м²·°С.

Рассчитать теплоту, воспринимаемую оребренной трубой и коэффициент эффективности ребер.

Материал трубы, форма и размеры ребер приведены в табл. I по вариантам.

Таблица I.

Номер варианта	Материал оребренной трубы	λ Вт/м·°С	Форма и размеры ребер
1	Чугун	63	Круглые, $D = 200$ мм
2	Сталь	45,4	Прямоугольные $A \times B = 200 \times 150$ мм
3	Латунь	85,5	Квадратные, $A = 180$ мм
4	Медь	384	Круглые, $D = 150$ мм
5	Алюминий	204	Прямоугольные $A \times B = 210 \times 170$ мм

Задача № I-2

Цилиндр двигателя с воздушным охлаждением диаметром $d = 170$ мм имеет 20 поперечных ребер постоянного сечения, толщина ребер $\delta_p = 4$ мм.

Температура поверхности цилиндра $t_c = 260^\circ\text{C}$, температура воздушного потока $t_m = 20^\circ\text{C}$, средний коэффициент теплоотдачи от ребер к воздуху $\alpha_p = 50$ Вт/м²·°С.

Определить количество тепла, передаваемого от поверхности ребер к воздуху, и коэффициент эффективности ребер.

Материал, форма и размеры ребер приведены в таблице 2 по вариантам.

Таблица 2.

Номер варианта	Материал ребер	λ , Вт/м \cdot °С	Форма и размеры ребер
1	Чугун	63	Круглые $D = 220$ мм
2	Сталь	45.4	Прямоугольные $A \times B = 220 \times 200$ мм
3	Латунь	85.5	Квадратные, $A = 220$ мм
4	Медь	384	Круглые $D = 240$ мм
5	Алюминий	204	Прямоугольные $A \times B = 230 \times 210$ мм

Задача № I-3

Рассчитать, во сколько раз больше тепла рассеивается оребренной поверхностью, чем той же поверхностью, но без ребер. Определить температуру торца ребер.

Площадь поверхности 1.5×1.5 м 2 , число прямых ребер постоянной толщины $n = 90$, толщина ребер $\delta_p = 3$ мм. Температура у основания ребер $t_1 = 60^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $t_m = 15^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от ребер $\alpha_p = 6.2$ Вт/м 2 ·°С, от межреберной поверхности $\alpha_c = 8$ Вт/м 2 ·°С.

Материал оребренной поверхности, длина ребер приведены в таблице 3 по вариантам.

Таблица 3.

Номер варианта	Материал оребренной поверхности	λ , Вт/м \cdot °С	l , мм
1	Чугун	63	30
2	Сталь	45.4	40
3	Латунь	85.5	35
4	Медь	384	30
5	Алюминий	204	35

Задача № I-4

Нагревательный прибор выполнен в виде вертикальной трубы с прямыми продольными ребрами постоянной толщины. Высота трубы $H = 1200$ мм, наружный диаметр трубы $d = 60$ мм, длина ребер $l = 85$ мм, число ребер $n = 12$, толщина ребра $\delta_p = \frac{1}{24} \pi d$. Температура у основания ребер $t_1 = 85^\circ\text{C}$, температура воздуха $t_m = 25^\circ\text{C}$, коэффициенты теплоотдачи от ребер и межреберной поверхности $\alpha_p = \alpha_c = 10$ Вт/м 2 ·°С.

Рассчитать количество теплоты, рассеиваемой оребренной поверхностью в окружающую среду, коэффициент эффективности ребер и температуру на торце ребер.

Материал оребренной трубы и коэффициенты теплопроводности по вариантам приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Номер варианта	1	2	3	4	5
Материал оребренной трубы	Чугун	Сталь	Латунь	Медь	Алюминий
λ , Вт/м \cdot °С	63	45,4	85,5	384	204

Задача № I-5

Рассчитать теплопередачу Q , Вт для участка оребренной трубы водяного экономайзера длиной $l_{rp} = 5$ м от потока дымовых газов к воде, протекающей внутри трубы.

Труба: $d_2/d_1 = 26/24$ мм, материал оребренной трубы, форма и размеры ребер указаны в таблице 5 по вариантам. Ребра поперечные, постоянной толщины $\delta_p = 2$ мм, шаг ребер $u = 7$ мм. $m = 0$

Вода: $\bar{t}_m = 60^\circ\text{C}$, $\alpha_1 = 5313$ Вт/м 2 ·°С.

Дымовые газы: $t_{m2} = 430^\circ\text{C}$, $\alpha_p = \alpha_c = 74,7$ Вт/м 2 ·°С.

Таблица 5.

Номер варианта	Материал оребренной трубы	λ , Вт/м \cdot °С	Форма и размеры ребер
1	Чугун	63	Круглые $D = 50$ мм
2	Сталь	45,4	Прямоугольные $A \times B = 50 \times 40$ мм
3	Латунь	85,5	Квадратные $A = 50$ мм
4	Медь	384	Круглые $D = 40$ мм
5	Алюминий	204	Прямоугольные $A \times B = 45 \times 30$ мм

Задача № I-6

Рассчитать теплопередачу Q , Вт для участка оребренной трубы длиной $l_{rp} = 4$ м от горячей воды, протекающей внутри трубы, к потоку воздуха, омывающего трубу.

Труба: $d_2/d_1 = 20/18$ мм, материал оребренной трубы, форма и размеры ребер указаны в таблице 6 по вариантам. Ребра поперечные, постоянной толщиной $\delta_p = 1$ мм, шаг ребер $u = 5$ мм.

Вода: $t_{m1} = 80^\circ\text{C}$, $\alpha_1 = 1733 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.
 Воздух: $t_{m2} = 20^\circ\text{C}$, $\alpha_p = \alpha_c = 90,36 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Таблица 6.

Номер варианта	Материал оребренной трубы	λ Вт/м \cdot °C	Форма и размеры ребер
1	Чугун	63	Круглые $D = 40$ мм
2	Сталь	45,4	Прямоугольные $A \times B = 40 \times 30$ мм
3	Латунь	85,5	Квадратные $A = 35$ мм
4	Медь	384	Круглые $D = 35$ мм
5	Алюминий	204	Прямоугольные $A \times B = 35 \times 30$ мм

СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТЕЛ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

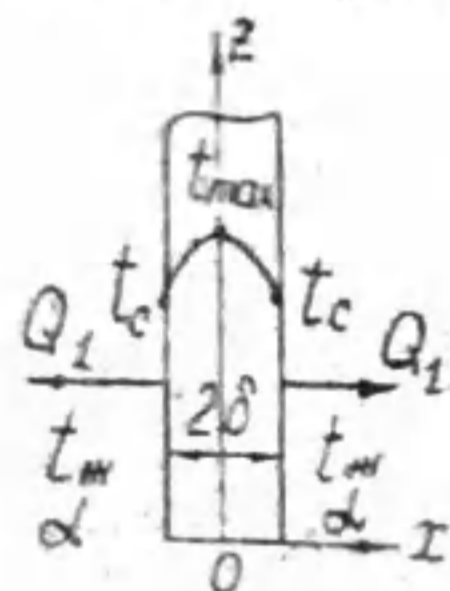
Важной исходной величиной для расчета теплопроводности тел с внутренними источниками тепла является плотность объемного тепловыделения

$$q_v = \frac{Q}{V}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

Для проводников электрического тока, выделяемой теплотой является Джоулева теплота, равная электрической мощности, $Q = N$, а плотность объемного тепловыделения

$$q_v = \frac{N}{V}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

Пластина при симметричных условиях охлаждения



Дано: толщина пластины 2δ , коэффициент теплопроводности λ , плотность объемного тепловыделения q_v , условия охлаждения: α, t_m .

Найти: Уравнение температурного поля $t = f(x)$, теплоту, рассеиваемую с поверхностью пластины, Q , Вт.

Математическая постановка задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2t}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda} &= 0, & \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=0} &= 0, \\ -\lambda \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=0} &= \alpha(t_c - t_m). \end{aligned} \right\} (6)$$

Решением системы уравнений (6) является уравнение температурного поля $t = f(x)$

$$t = t_m + \frac{q_v \delta}{\alpha} + \frac{q_v}{2\lambda} (\delta^2 - x^2). \quad (7)$$

Теплота, рассеиваемая боковыми поверхностями пластины при симметричных условиях охлаждения, одинакова и равна

$$Q = 2Q_1 = q_v \cdot V, \text{ Вт}$$

Используя (7), запишите формулы для расчета $t_{max}, t_c, t_{max} - t_c$.

Пластина с несимметричными условиями охлаждения

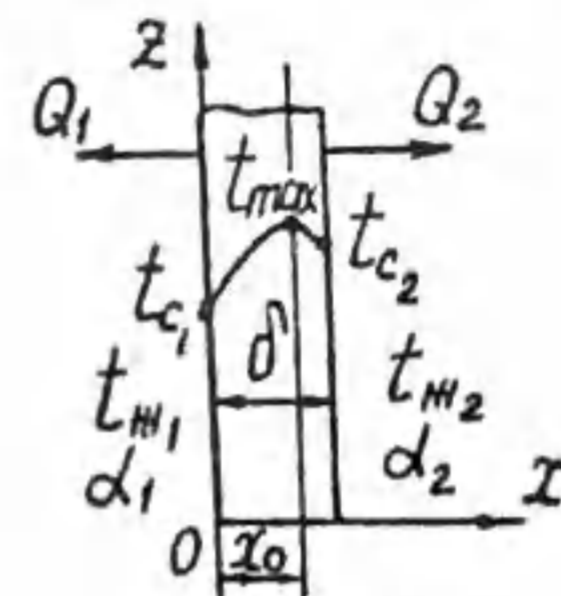


Рис. 6

Дано: $\delta, \lambda, q_v, t_{m1}, \alpha_1, t_{m2}, \alpha_2$.

Найти: $t = f(x), Q_1, Q_2, x_0$.

Математическая постановка задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2t}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda} &= 0, \\ -\lambda \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=\delta} &= \alpha_2(t_{c2} - t_{m2}), \\ \lambda \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=0} &= \alpha_1(t_{c1} - t_{m1}), \\ \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=x_0} &= 0. \end{aligned} \right\} (8)$$

Решение системы уравнений (8) дает уравнение температурного поля $t = f(x)$ и формулу для расчета координаты максимальной температуры x_0 .

$$\left. \begin{aligned} t &= t_{m1} - \frac{q_v}{2\lambda} x^2 + \left(x + \frac{\lambda}{\alpha_1}\right) M, \\ M &= \frac{\frac{q_v \delta}{\alpha_2} + \frac{q_v \delta^2}{2\lambda} + (t_{m2} - t_{m1})}{\frac{\lambda}{\alpha_2} + \delta + \frac{\lambda}{\alpha_1}}, \\ x_0 &= \frac{\lambda}{q_v} M. \end{aligned} \right\} (9)$$

Теплота, рассеиваемая поверхностями пластины,

$$Q_1 = q_v V_1, \text{ Вт}$$

$$Q_2 = q_v V_2, \text{ Вт}$$

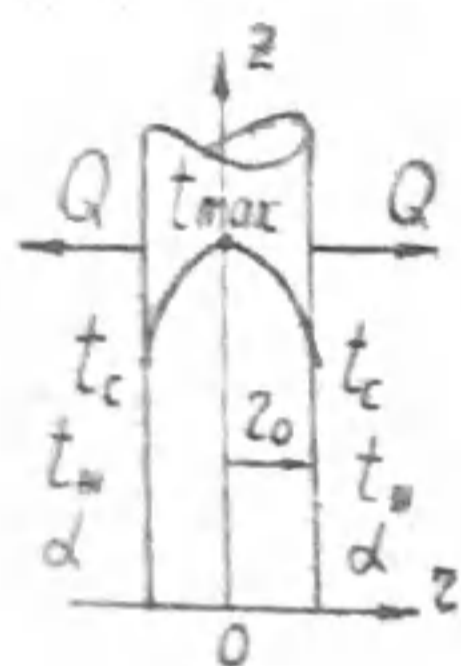
$$V_1 + V_2 = V, \text{ м}^3$$

Используя (9), запишите формулы для расчета t_{c1}, t_{c2}, t_{max} .
Решите самостоятельно задачу о пластине с внутренними источниками тепла при несимметричных условиях охлаждения и граничных условиях I рода:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda} &= 0, \\ \text{при } x=0 \quad t &= t_{c1}, \\ \text{при } x=\delta \quad t &= t_{c2}, \\ \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=x_0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

и получите уравнение температурного поля $t=f(x)$, формулы для расчета $x_0, t_{max}, t_{max}-t_{c1}, t_{max}-t_{c2}$.

Цилиндрический стержень



Дано: $z_0, \lambda, q_v, \alpha, t_m$.
Найти: $t=f(z), Q, \delta m$.

Математическая постановка задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{dt}{dz} + \frac{q_v}{\lambda} &= 0, \\ \left(\frac{dt}{dz}\right)_{z=0} &= 0, \\ -\lambda \left(\frac{dt}{dz}\right)_{z=z_0} &= \alpha(t_c - t_m). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Решением системы уравнений (11) является уравнение температурного поля $t=f(z)$:

$$t = t_m + \frac{q_v z_0}{2\alpha} + \frac{q_v}{4\lambda} (z_0^2 - z^2) \quad (12)$$

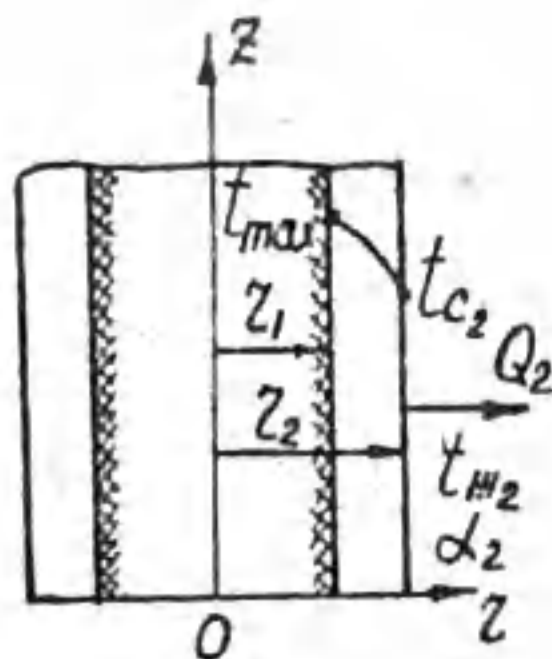
Используя (12), запишите формулы для расчета $t_{max}, t_c, t_{max}-t_c$.
Тепловой поток, рассеиваемый поверхностью стержня,

$$Q = q_v \cdot V, \delta m$$

Цилиндрическая стенка

а) Охлаждение только по наружной поверхности

Дано: $z_1, z_2, q_v, \lambda, t_{m2}, \alpha_2$.
Найти: $t=f(z), Q_2$.



Математическая постановка задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{dt}{dz} + \frac{q_v}{\lambda} &= 0, \\ \left(\frac{dt}{dz}\right)_{z=z_1} &= 0, \\ -\lambda \left(\frac{dt}{dz}\right)_{z=z_2} &= \alpha_2(t_{c2} - t_{m2}). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

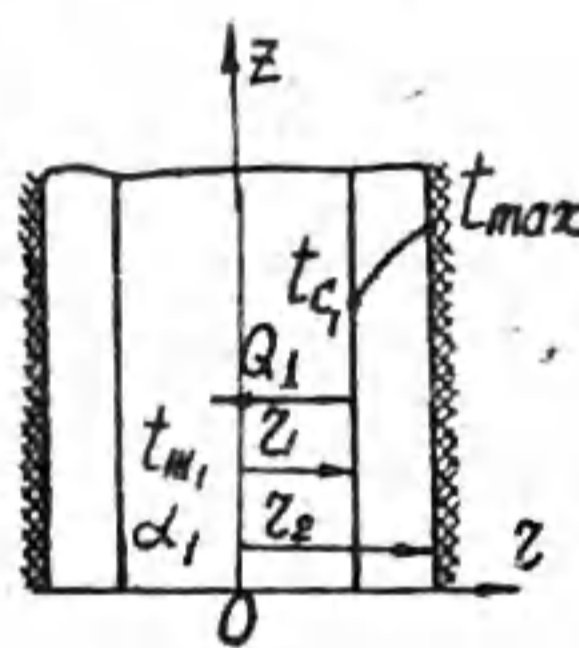
Уравнение температурного поля $t=f(z)$:

$$t = t_{m2} + \frac{q_v z_2}{2\alpha_2} \left[1 - \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 \right] + \frac{q_v z_2^2}{4\lambda} \left[1 + \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 \ln \frac{z}{z_2} - \left(\frac{z}{z_2}\right)^2 \right]. \quad (14)$$

Запишите формулы для расчета $t_{max}, t_{c2}, t_{max}-t_{c2}$.
Теплота, рассеиваемая наружной поверхностью стенки,

$$Q_2 = q_v \cdot V = q_v \pi (z_2^2 - z_1^2) l.$$

б) Охлаждение только по внутренней поверхности



Дано: $z_1, z_2, q_v, \lambda, t_m, \alpha_1$.
Найти: $t=f(z), Q_1$.

Математическая постановка задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{dt}{dz} + \frac{q_v}{\lambda} &= 0, \\ \left(\frac{dt}{dz}\right)_{z=z_2} &= 0, \\ \lambda \left(\frac{dt}{dz}\right)_{z=z_1} &= \alpha_1(t_{c1} - t_{m1}). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Уравнение температурного поля:

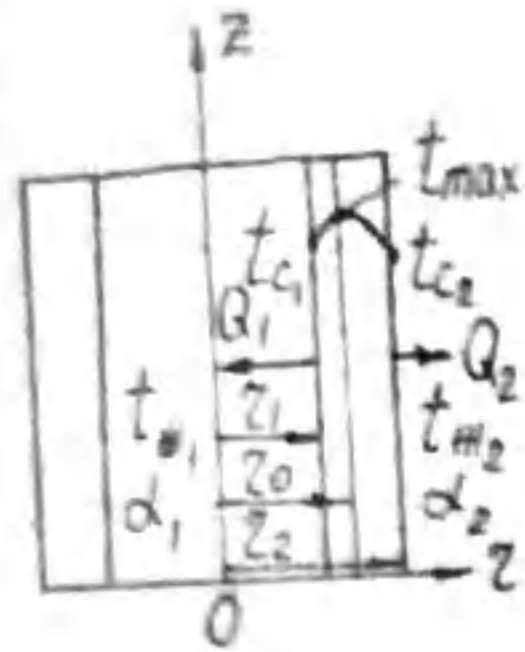
$$t = t_{m1} + \frac{q_v z_1}{2\alpha_1} \left[\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 - 1 \right] + \frac{q_v z_2^2}{4\lambda} \left[2 \ln \frac{z}{z_1} + \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 - \left(\frac{z}{z_2}\right)^2 \right]. \quad (16)$$

Получите формулы для расчета $t_{max}, t_{c1}, t_{max}-t_{c1}$.
Теплота, рассеиваемая внутренней поверхностью стенки,

$$Q_1 = q_v \cdot V = q_v \pi (z_2^2 - z_1^2) l.$$

в) Охлаждение по внутренней и по наружной поверхностям

Дано: $z_1, z_2, q_v, \lambda, t_{m1}, t_{m2}, \alpha_1, \alpha_2$.



Математическая постановка задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{dt}{dz} + \frac{q_v}{\lambda} &= 0, \\ \left(\frac{dt}{dz} \right)_{z=r_0} &= 0, \\ \text{при } z=r_1 \quad t &= t_{c1}, \\ \text{при } z=r_2 \quad t &= t_{c2}. \end{aligned} \right\} \quad (I7)$$

Решение системы уравнений (I7) дает следующие расчетные формулы

$$r_0^2 = \frac{q_v (r_2^2 - r_1^2) - 4\lambda (t_{c1} - t_{c2})}{2q_v \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

$$t_{max} - t_{c2} = \frac{q_v r_0^2}{4\lambda} \left[\left(\frac{r_2}{r_0} \right)^2 - 2 \ln \frac{r_2}{r_0} - 1 \right],$$

$$t_{max} - t_{c1} = \frac{q_v r_0^2}{4\lambda} \left[\left(\frac{r_1}{r_0} \right)^2 + 2 \ln \frac{r_0}{r_1} - 1 \right].$$

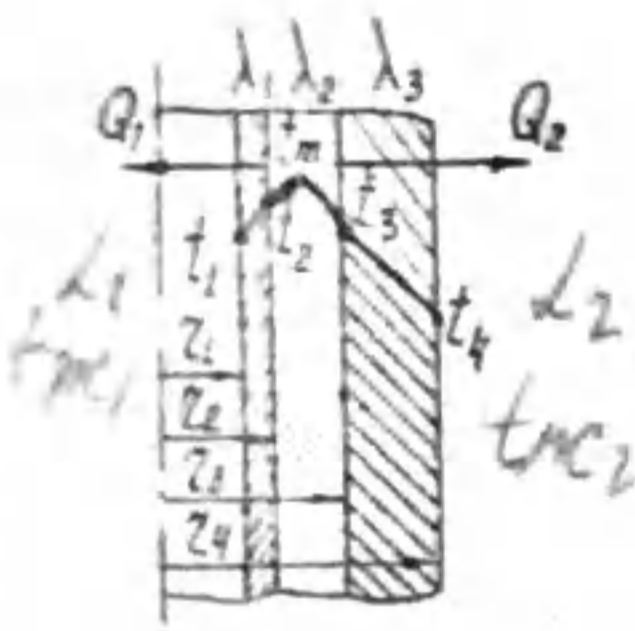
Теплота, рассеиваемая внутренней и наружной поверхностями,

$$Q_1 = q_v \pi l (r_0^2 - r_1^2),$$

$$Q_2 = q_v \pi l (r_2^2 - r_0^2),$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = q_v \pi l (r_2^2 - r_1^2).$$

Пример решения задачи



Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим средним слоем дано: $r_1 = 20$ мм, $r_2 = 22$ мм, $r_3 = 30$ мм, $r_4 = 40$ мм, $\lambda_1 = 80$ Вт/м $^\circ$ С, $\lambda_2 = 15$ Вт/м $^\circ$ С, $\lambda_3 = 3$ Вт/м $^\circ$ С, $t_{m1} = 382^\circ$ С, $\alpha_1 = 300$ Вт/м 2 · $^\circ$ С, $t_{m2} = 20^\circ$ С, $\alpha_2 = 100$ Вт/м 2 · $^\circ$ С.

Рассчитать: координату максимальной температуры r_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, температуры t_1 , t_2 , t_3 , t_4 .

Решение

Согласно задаче о цилиндрической стенке с внутренним тепловыделением и охлаждением снаружи и изнутри, и с учетом исходных данных, можно записать следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} Q_1 &= q_v \pi l (r_0^2 - r_1^2), \\ Q_2 &= q_v \pi l (r_3^2 - r_0^2), \\ Q_2 &= \frac{t_3 - t_{m2}}{\frac{1}{2\pi l \lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_4}}, \\ Q_1 &= \frac{t_2 - t_{m1}}{\frac{1}{2\pi l \lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_1 \pi d_1}}, \\ r_0^2 &= \frac{q_v (r_3^2 - r_2^2) - 4\lambda_2 (t_2 - t_3)}{2q_v \ln \frac{r_3}{r_2}}, \end{aligned} \right.$$

решение которой позволяет найти $Q_1 = 4427,4$ Вт/м, $Q_2 = 8635$ Вт/м, $t_2 = 500,32^\circ$ С, $t_3 = 495,6^\circ$ С, $r_0 = 0,025$ м.

Максимальная температура в тепловыделяющем слое

$$t_{max} = t_2 + \frac{q_v r_0^2}{4\lambda_2} \left[\left(\frac{r_2}{r_0} \right)^2 - 2 \ln \frac{r_2}{r_0} - 1 \right] = 503,45^\circ \text{С.}$$

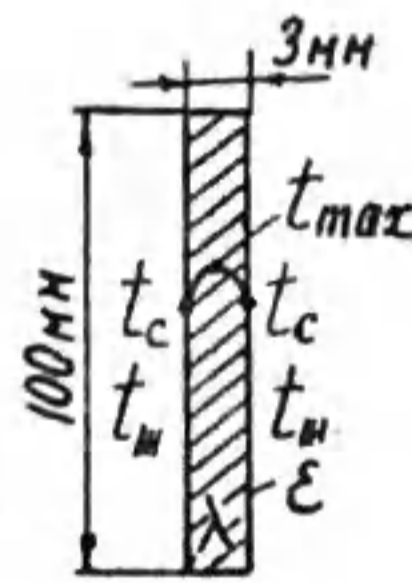
Температуры t_1 и t_4 определяются из уравнений

$$Q_2 = \alpha_2 \pi d_4 (t_4 - t_{m2}), \quad t_4 = 363,75^\circ \text{С.}$$

$$Q_1 = \alpha_1 \pi d_1 (t_1 - t_{m1}), \quad t_1 = 419,5^\circ \text{С.}$$

З А Д А Ч И

Задача № 2-1

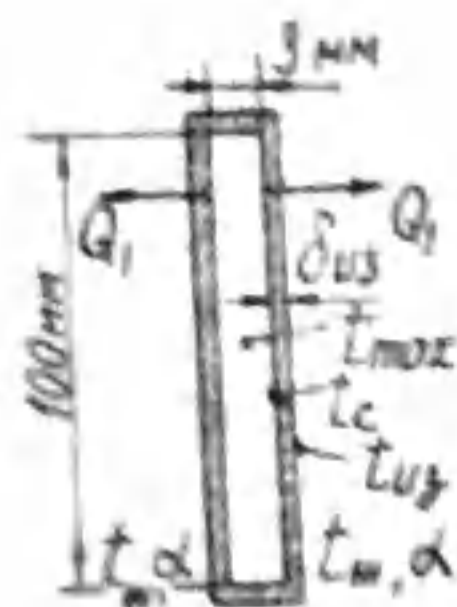


Допустимая нагрузка для стальных шин прямоугольного сечения 3x100 мм не должна превышать 300 А. Максимальная температура шин при температуре окружающего воздуха $t_{m} = 25^\circ$ С должна быть не выше 70° С.

Коэффициент теплопроводности $\lambda = 64$ Вт/м $^\circ$ С, удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,13$ ом·мм 2 /м, степень черноты поверхности шины $\epsilon = 0,2$.

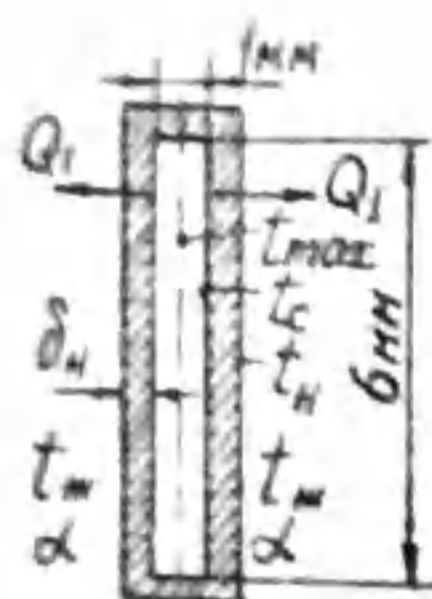
Рассчитать перепад температуры в шине и конвективную составляющую коэффициента теплоотдачи.

Задача № 2-2



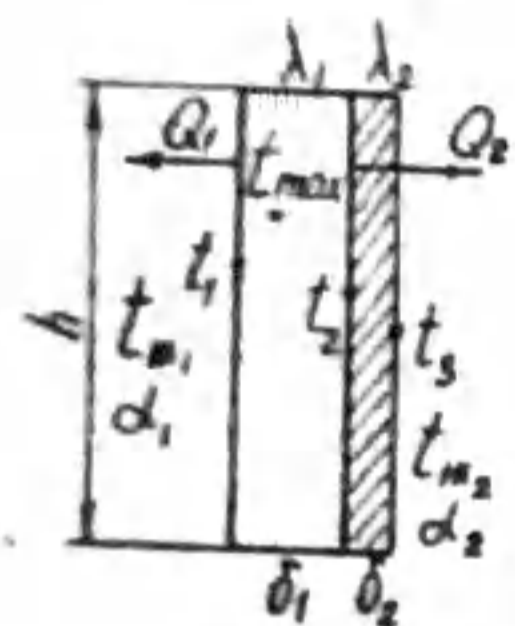
Стальная шина прямоугольного сечения 100x3 мм ($\lambda = 50 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$) имеет электроизоляционный слой $\delta_{\text{из}} = 0,5 \text{ мм}$ ($\lambda_{\text{из}} = 0,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$). Электрическая нагрузка $I = 250 \text{ А}$ ($\rho = 0,13 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), $\epsilon_{\text{из}} = 0,8$, $t_{\text{м}} = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = 4,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C}$. Рассчитать: теплоту Q_2 , Вт/м, передаваемую с боковой поверхности шины, температуру на поверхности изоляции ($t_{\text{из}}$), перепады температур в шине и в слое изоляции. Теплоотдачей с торцов пренебречь. Учесть теплообмен излучением.

Задача № 2-3



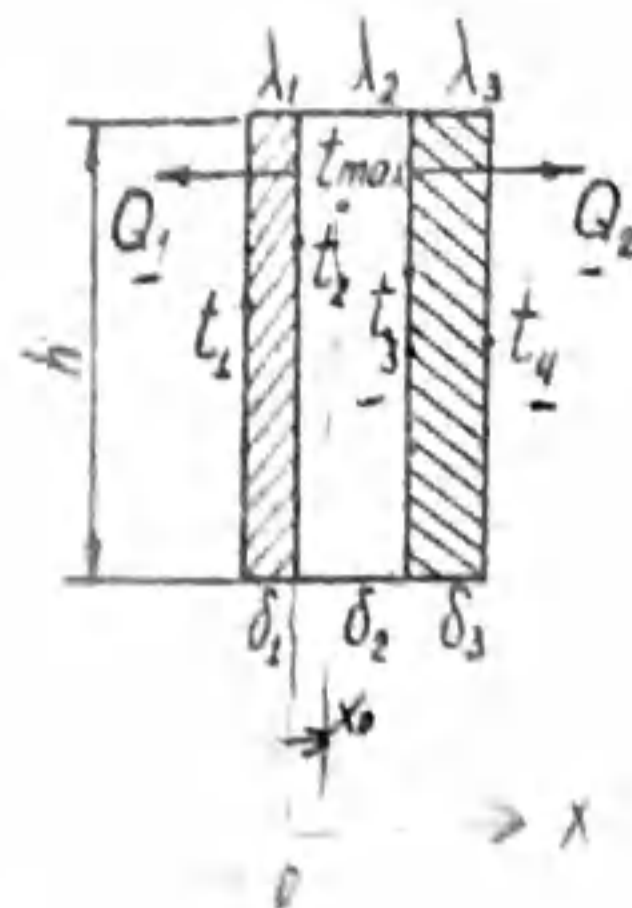
Константановая лента ($\lambda = 20 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$) сечением 1x6 мм, длиной l м используется как кипятильник. Температура кипящей воды $t_{\text{м}} = 100^\circ\text{C}$, $\alpha = 1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C}$. Ток 20А, напряжение 200 В. На поверхности нагревателя образовалась накипь толщиной $\delta_n = 0,5 \text{ мм}$ ($\lambda_n = 0,8 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$). Рассчитать: теплоту Q_2 , передаваемую с боковой поверхности нагревателя, температуры на поверхности накипи, на поверхности и в центре нагревателя. Теплоотдачей с торцов пренебречь.

Задача № 2-4



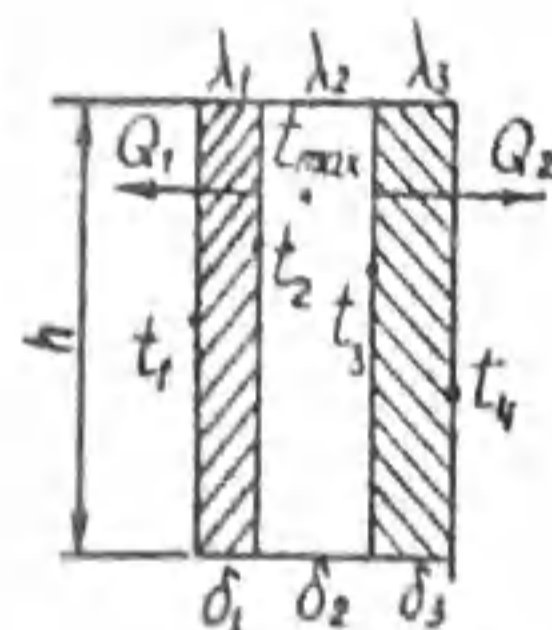
В двухслойной плоской стенке один слой толщиной δ_1 - с внутренним тепловыделением. Дано: $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$, $h = 1,5 \text{ м}$, $\delta_1 = 15 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $\delta_2 = 5 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 2 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $t_{\text{м}1} = 180^\circ\text{C}$, $\alpha_1 = 130 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $t_{\text{м}2} = 30^\circ\text{C}$, $\alpha_2 = 85 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C}$. Рассчитать: теплоту, рассеиваемую боковыми поверхностями $Q_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, $Q_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, координату максимальной температуры x_0 и максимальную температуру в тепловыделяющем слое t_{max} , температуры t_1, t_2, t_3 . Теплоотдачей с торцов пренебречь.

Задача № 2-5



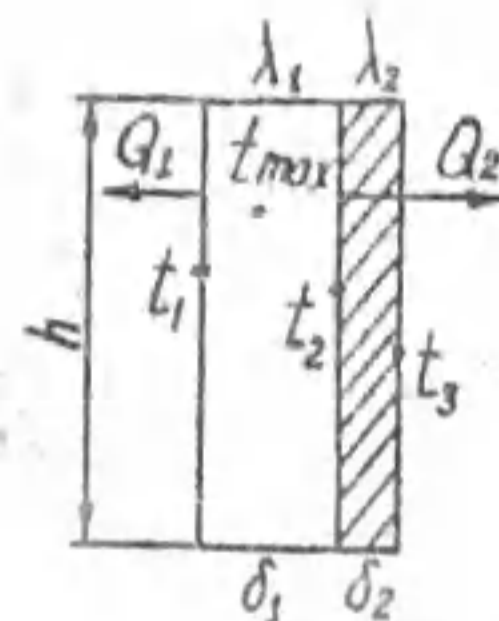
В трехслойной плоской стенке средний слой толщиной δ_2 - тепловыделяющий. Дано: $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$, $h = 2 \text{ м}$, $\delta_2 = 5 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 30 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $\delta_1 = 20 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $\delta_3 = 10 \text{ мм}$, $\lambda_3 = 0,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $\alpha_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $t_4 = 70^\circ\text{C}$. Рассчитать: $Q_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, координату максимальной температуры x_0 и максимальную температуру t_{max} тепловыделяющего слоя, температуры t_2, t_3, t_4 . Теплоотдачей с торцов пренебречь.

Задача № 2-6



В трехслойной плоской стенке средний слой толщиной δ_2 - тепловыделяющий. Дано: $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$, $h = 2 \text{ м}$, $\delta_2 = 5 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 30 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $\delta_1 = 20 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $\delta_3 = 10 \text{ мм}$, $\lambda_3 = 0,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $t_1 = 945^\circ\text{C}$, $t_4 = 70^\circ\text{C}$. Рассчитать: теплоту, рассеиваемую боковыми поверхностями $Q_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, $Q_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, координату максимальной температуры x_0 и максимальную температуру t_{max} тепловыделяющего слоя, температуры t_2 и t_3 . Теплоотдачей с торцов пренебречь.

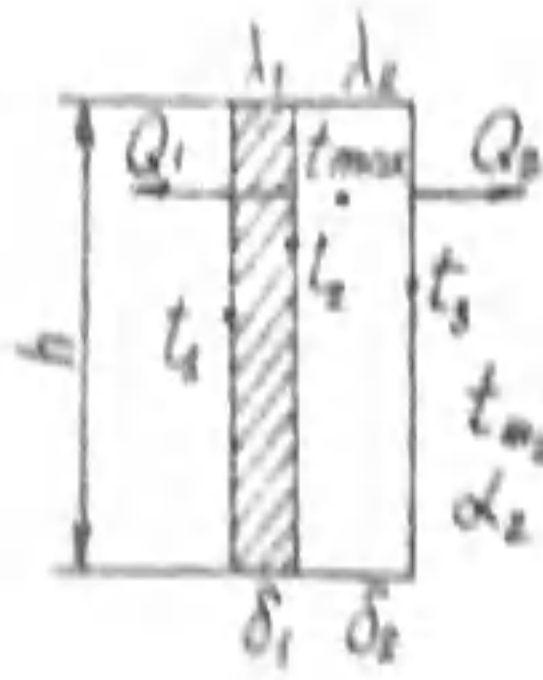
Задача № 2-7



В двухслойной плоской стенке один слой толщиной δ_1 - с внутренним тепловыделением. Дано: $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$, $h = 1,5 \text{ м}$, $\delta_1 = 15 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $\delta_2 = 5 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 2 \text{ Вт/м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$, $t_1 = 869^\circ\text{C}$, $t_3 = 739,9^\circ\text{C}$. Рассчитать: теплоту, рассеиваемую боковыми поверхностями $Q_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, $Q_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, координату максимальной температуры x_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, температуру t_2 . Теплоотдачей с торцов пренебречь.

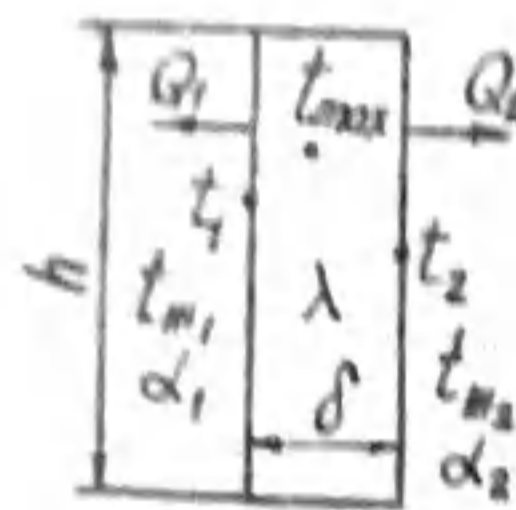
1455741

Задача № 2-8



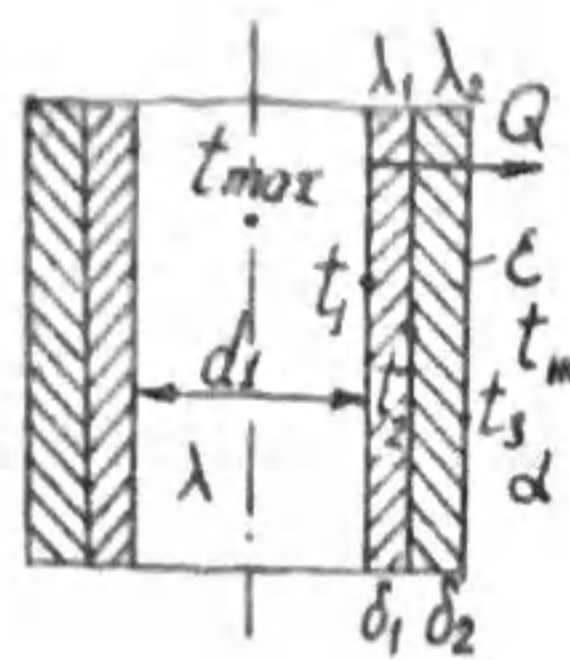
В двухслойной плоской стенке один слой толщиной δ_2 - теплопроводящий.
 Дано: $\delta_2 = 10$ мм, $\lambda_1 = 3$ Вт/м $^\circ$ С, $\delta_1 = 20$ мм, $\lambda_2 = 10$ Вт/м $^\circ$ С, $h = 2$ м, $Q_1 = 7 \cdot 10^4$ Вт/м, $Q_2 = 13 \cdot 10^4$ Вт/м, $t_{m_2} = 340^\circ$ С, $\alpha_2 = 270$ Вт/м 2 · $^\circ$ С.
 Рассчитать: координату максимальной температуры x и максимальную температуру t_{max} в теплопроводящем слое, температуры t_1 , t_2 , t_3 . Теплоотдачей с торцов пренебречь.

Задача № 2-9



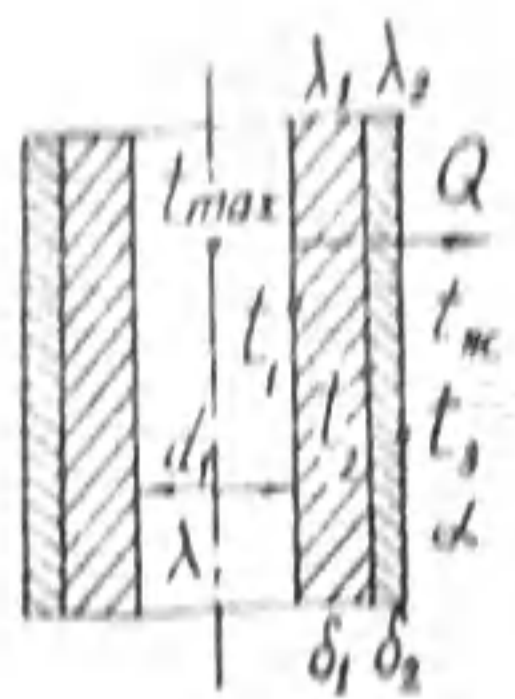
Для пластины с внутренним тепловыделением дано: $\delta = 20$ мм, $h = 2$ м, $\lambda = 12$ Вт/м $^\circ$ С, $t_{m_1} = 320^\circ$ С, $\alpha_1 = 170$ Вт/м 2 · $^\circ$ С, $t_{m_2} = 80^\circ$ С, $\alpha_2 = 350$ Вт/м 2 · $^\circ$ С, $Q_1 = 9.58 \cdot 10^4$ Вт/м, $Q_2 = 30.42 \cdot 10^4$ Вт/м.
 Рассчитать: координату максимальной температуры x_0 и максимальную температуру t_{max} , температуры на поверхностях пластины t_1 и t_2 . Теплоотдачей с торцов пренебречь.

Задача № 2-10



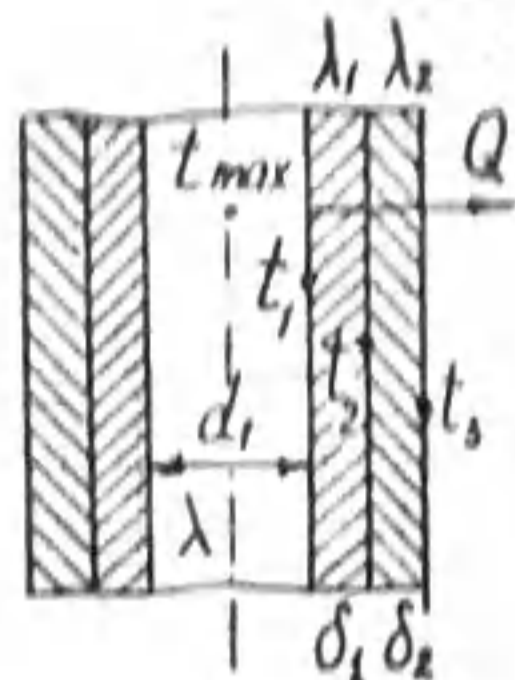
Тепловыделяющий элемент с объемной плотностью тепловыделения q_v в форме цилиндра диаметром d_1 , опрессованный электроизоляционным материалом толщиной δ_2 , имеет металлическую оболочку толщиной δ_1 . Дано: $d_1 = 80$ мм, $\lambda = 15$ Вт/м $^\circ$ С, $\delta_1 = 3$ мм, $\lambda_1 = 3$ Вт/м $^\circ$ С, $\delta_2 = 5$ мм, $\lambda_2 = 45$ Вт/м $^\circ$ С, $t_3 = 830^\circ$ С, $t_m = 100^\circ$ С, $\alpha = 180$ Вт/м 2 · $^\circ$ С, $q_v = 1.253 \cdot 10^7$ Вт/м 3 .
 Рассчитать: передаваемую теплоту Q , $\frac{Q}{M}$, перепады температур $t_{max} - t_1$, $t_1 - t_2$, $t_2 - t_3$, температуру в центре элемента t_{max} степень черноты поверхности оболочки ϵ .

Задача № 2-11



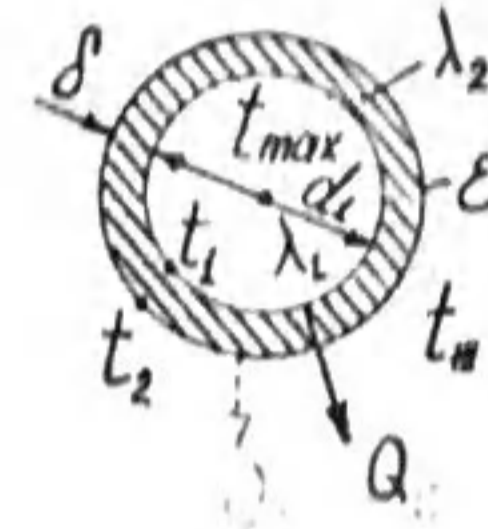
Тепловыделяющий элемент с объемной плотностью тепловыделения q_v в форме цилиндра диаметром d_1 , опрессованный электроизоляционным материалом толщиной δ_2 , имеет металлическую оболочку толщиной δ_1 . Дано: $d_1 = 40$ мм, $\lambda = 15$ Вт/м $^\circ$ С, $\delta_1 = 10$ мм, $\lambda_1 = 5$ Вт/м $^\circ$ С, $\delta_2 = 5$ мм, $\lambda_2 = 50$ Вт/м $^\circ$ С, $t_3 = 50^\circ$ С, $t_m = 20^\circ$ С, $\alpha = 150$ Вт/м 2 · $^\circ$ С.
 Рассчитать: Q , $\frac{Q}{M}$, перепады температур $t_2 - t_3$, $t_1 - t_2$, температуру в центре элемента t_{max} и на поверхности t_1 .

Задача № 2-12



Тепловыделяющий элемент с объемной плотностью тепловыделения q_v в форме цилиндра диаметром d_1 , опрессованный электроизоляционным материалом толщиной δ_2 , имеет металлическую оболочку толщиной δ_1 . Дано: $d_1 = 40$ мм, $\lambda = 15$ Вт/м $^\circ$ С, $\delta_1 = 8$ мм, $\lambda_1 = 3$ Вт/м $^\circ$ С, $\delta_2 = 8$ мм, $\lambda_2 = 80$ Вт/м $^\circ$ С, $t_3 = 50^\circ$ С, $q_v = 10$ МВт/м 3 .
 Рассчитать: Q , $\frac{Q}{M}$, t_1 , t_2 , температуру в центре элемента t_{max} .

Задача № 2-13



Тепловыделяющий элемент в форме цилиндрического стержня диаметром d_1 имеет металлическую оболочку толщиной δ . Дано: $d_1 = 96$ мм, $\lambda_1 = 20$ Вт/м $^\circ$ С, температура в центре элемента $t_{max} = 1280^\circ$ С, на поверхности элемента $t_1 = 976^\circ$ С, $t_m = 50^\circ$ С, $\epsilon = 0.45$, $\delta = 7$ мм, $\lambda_2 = 42$ Вт/м $^\circ$ С.
 Рассчитать: q_v , $\frac{Q}{M}$, Q , $\frac{Q}{M}$, t_2 , конвективную составляющую теплоотдачи Q_k , Вт/м, лучистую составляющую теплоотдачи Q_l , Вт/м.

Задача № 2-14

Тепловыделяющий элемент в форме цилиндрического стержня диаметром d_1 имеет металлическую оболочку толщиной δ .

Дано: $d_1 = 85$ мм, $\lambda_1 = 15$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\delta = 5$ мм, $\lambda_2 = 36$ Вт/м $^{\circ}$ С, $t_2 = 560^{\circ}$ С, $t_m = 35^{\circ}$ С, $\alpha = 230$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С, $\epsilon = 0,62$.

Рассчитать: Q , Вт/м, t_1 , t_{max} , учесть теплоотдачу излучением с поверхности оболочки.

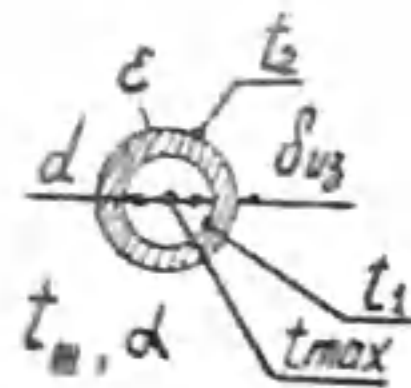


Задача № 2-15

Алюминиевый провод диаметром d покрыт резиновой изоляцией толщиной $\delta_{из}$ и находится под напряжением. Температура окружающего воздуха t_m .

Дано: $d = 2$ мм, $\lambda = 204$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\delta_{из} = 1$ мм, $\lambda_{из} = 0,16$ Вт/м $^{\circ}$ С, удельное электрическое сопротивление $\rho = 2,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, ток $I = 24,4$ А, $t_m = 20^{\circ}$ С, $\alpha = 10$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С, $\epsilon = 0,9$.

Рассчитать температуры в центре t_{max} и на поверхности провода t_1 , на поверхности изоляции t_2 . Учесть теплообмен излучением.

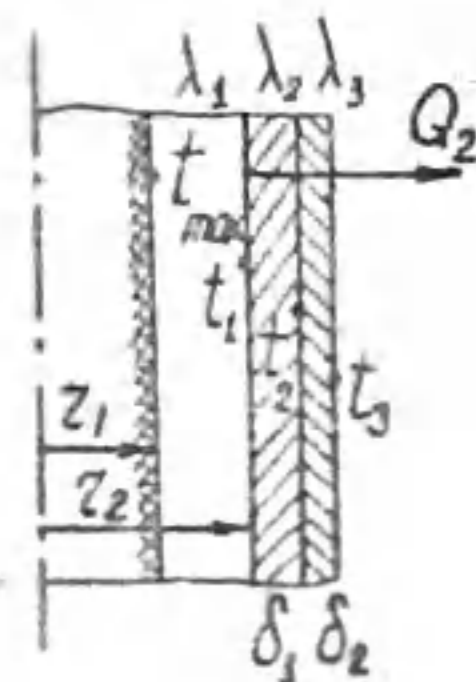


Задача № 2-16

Тепловыделяющий элемент в форме трубы отделяется от охлаждающего его теплоносителя слоем графита толщиной δ_1 и металлической оболочкой толщиной δ_2 . Теплоотвод только по наружной поверхности.

Дано: $r_1 = 40$ мм, $r_2 = 52$ мм, $\delta_1 = 5$ мм, $\delta_2 = 3$ мм, $\lambda_1 = 10$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\lambda_2 = 158$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\lambda_3 = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С, $q_v = 10^7$ Вт/м 3 , $t_3 = 750^{\circ}$ С.

Рассчитать: Q_2 , Вт/м, максимальную и минимальную температуры в тепловыделяющем элементе, перепады температур по толщине металлической оболочки и по толщине слоя графита.

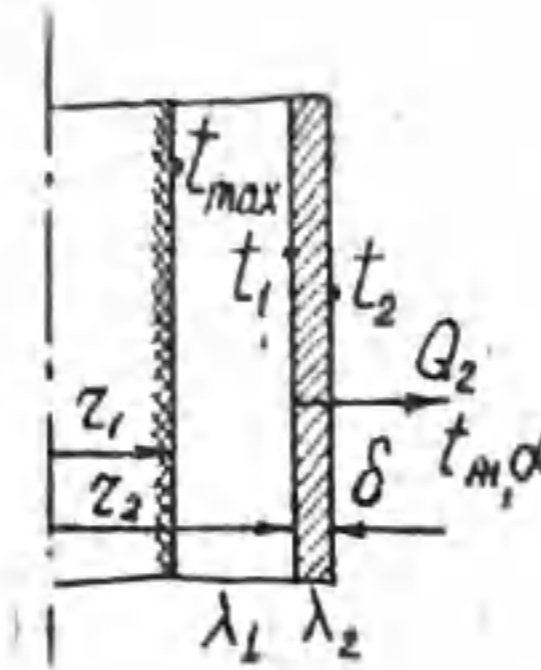


Задача № 2-17

Тепловыделяющий элемент в форме трубы заключен в металлическую оболочку толщиной δ и охлаждается жидким теплоносителем. Теплоотвод с внутренней поверхности элемента отсутствует ($Q_1 = 0$).

Дано: $r_1 = 40$ мм, $r_2 = 50$ мм, $\delta = 3$ мм, $\lambda_1 = 10$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\lambda_2 = 45$ Вт/м $^{\circ}$ С, $q_v = 10^7$ Вт/м 3 , $t_m = 180^{\circ}$ С, $\alpha = 200$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С.

Рассчитать: Q_2 , Вт/м, максимальную и минимальную температуры в тепловыделяющем элементе, температуру на наружной поверхности металлической оболочки.

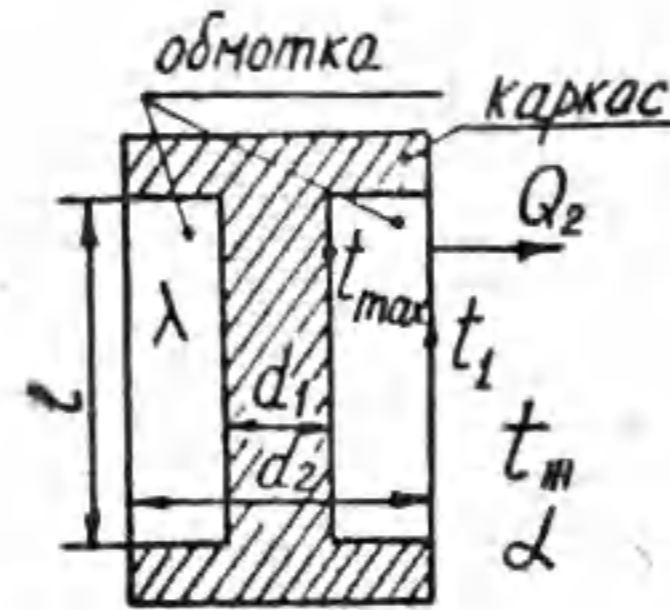


▲ Задача № 2-18

Обмотка из медного провода находится под напряжением. Теплоотвод - только с наружной поверхности.

Дано: электрическая мощность $N = 112,1$ Вт, $\lambda = 15$ Вт/м $^{\circ}$ С, $d_1 = 70$ мм, $d_2 = 150$ мм, $l = 30$ см, температура воздуха $t_m = 20^{\circ}$ С, $\alpha = 10$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С, степень черноты поверхности обмотки $\epsilon = 0,8$.

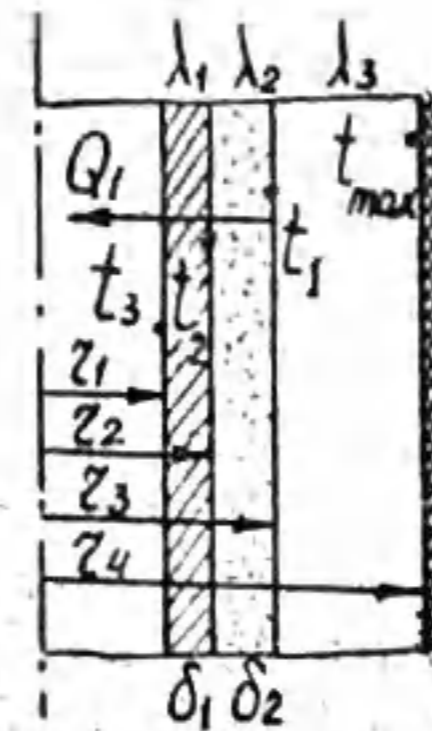
Рассчитать максимальную и минимальную температуры в обмотке. Учесть теплоотдачу излучением.



Задача № 2-19

Тепловыделяющий элемент в форме трубы по наружной поверхности теплоизолирован ($Q_2 = 0$). Внутренняя поверхность элемента отделена от теплоносителя, с помощью которого отводится теплота Q_1 , металлической оболочкой толщиной δ_1 и слоем графита толщиной δ_2 .

Дано: $r_3 = 40$ мм, $r_4 = 52$ мм, $\delta_1 = 3$ мм, $\delta_2 = 5$ мм, $\lambda_1 = 30$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\lambda_2 = 158$ Вт/м $^{\circ}$ С.



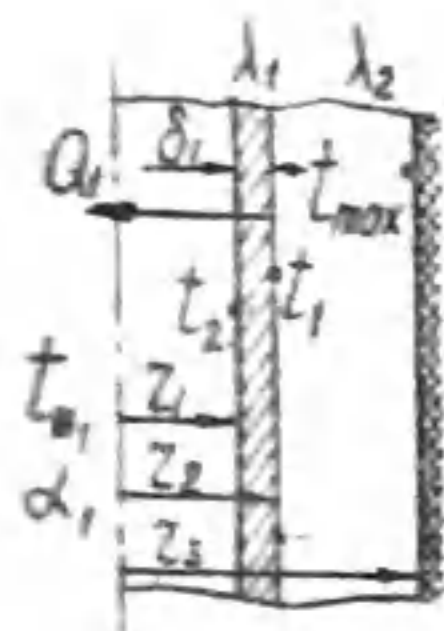
$\lambda_3 = 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$, $t_3 = 720^\circ\text{С}$.
 Рассчитать: Q_1 , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, максимальную и минимальную температуры в тепловыделяющем элементе, перепады температур по толщине металлической оболочки и по толщине слоя графита.

Задача № 2-20

Тепловыделяющий элемент в форме трубы по наружной поверхности изолирован ($Q_2 = 0$).
 Внутренняя поверхность элемента от теплоносителя с температурой t_{m1} , с помощью которого отводится теплота Q_1 , отделена металлической оболочкой толщиной δ_1 .

Дано: $r_2 = 40 \text{ мм}$, $r_3 = 52 \text{ мм}$, $\delta_1 = 3 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 30 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\lambda_3 = 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $t_{m1} = 180^\circ\text{С}$, $\alpha_1 = 230 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°С}$, $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$.

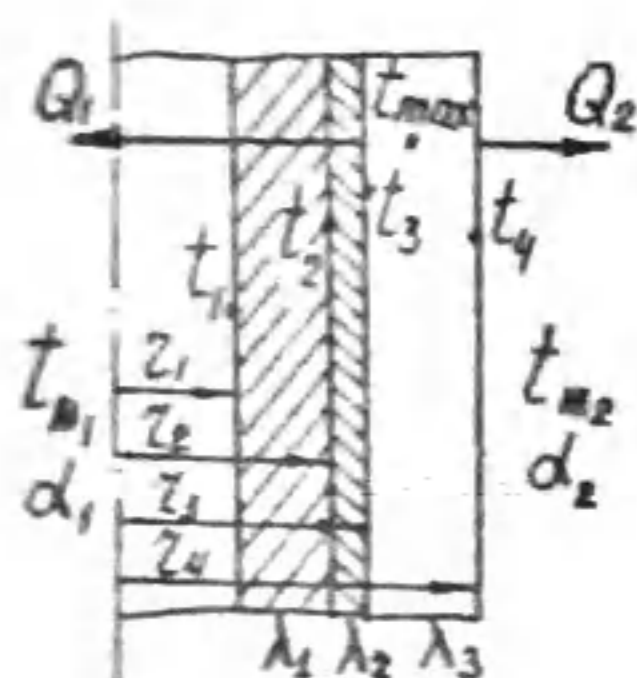
Рассчитать: Q_1 , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$; максимальную и минимальную температуры в тепловыделяющем элементе, перепад температур по толщине металлической оболочки.



Задача № 2-21

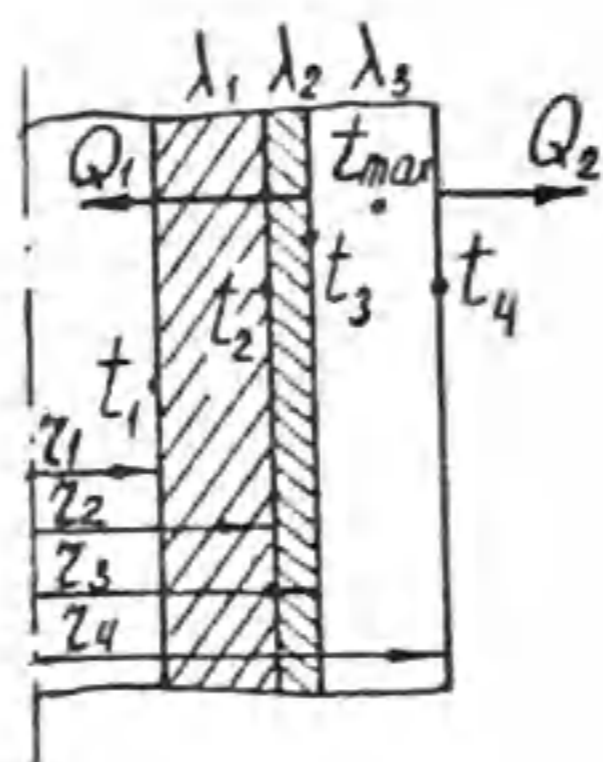
Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим наружным слоем, дано: $r_1 = 20 \text{ мм}$, $r_2 = 30 \text{ мм}$, $r_3 = 32 \text{ мм}$, $r_4 = 40 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 3 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\lambda_2 = 80 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\lambda_3 = 15 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $t_{m1} = 20^\circ\text{С}$, $\alpha_1 = 100 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°С}$, $t_{m2} = 150^\circ\text{С}$, $\alpha_2 = 93 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°С}$, $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$.

Рассчитать: координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, $Q_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, $Q_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, t_1 , t_2 , t_3 , t_4 .



Задача № 2-22

Для трехслойной цилиндрической стенки с теп-



ловыделяющим наружным слоем, дано: $r_1 = 20 \text{ мм}$, $r_2 = 30 \text{ мм}$, $r_3 = 32 \text{ мм}$, $r_4 = 40 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 3 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\lambda_2 = 80 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\lambda_3 = 15 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $t_1 = 522,5^\circ\text{С}$, $Q_2 = 11775 \text{ Вт/м}$, $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$.

Рассчитать: координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, $Q_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, t_2 , t_3 , t_4 .

Задача № 2-23

Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим внутренним слоем дано: $r_1 = 28 \text{ мм}$, $r_2 = 34 \text{ мм}$, $r_3 = 38 \text{ мм}$, $r_4 = 40 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 15 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\lambda_2 = 3 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\lambda_3 = 80 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$, $\alpha_1 = 50 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°С}$, $t_{m1} = 80^\circ\text{С}$, $\alpha_2 = 120 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°С}$, $t_{m2} = 20^\circ\text{С}$.

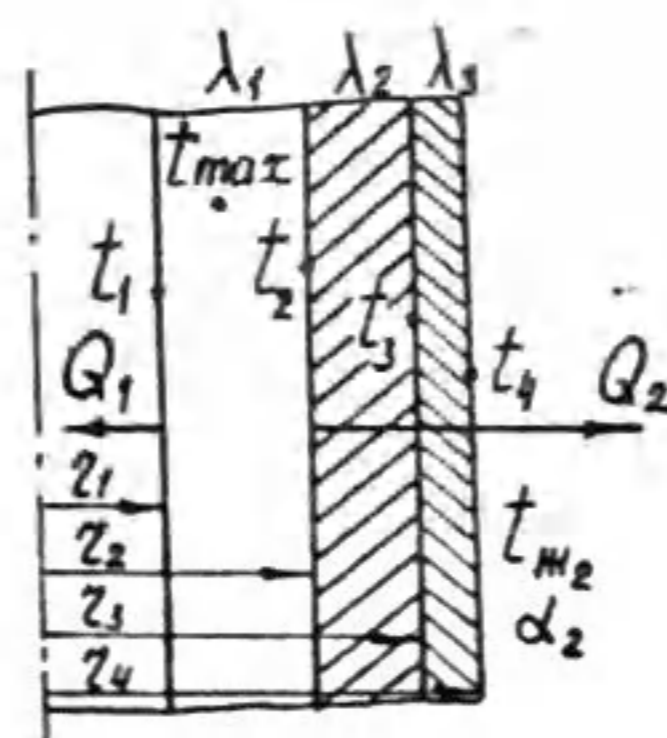
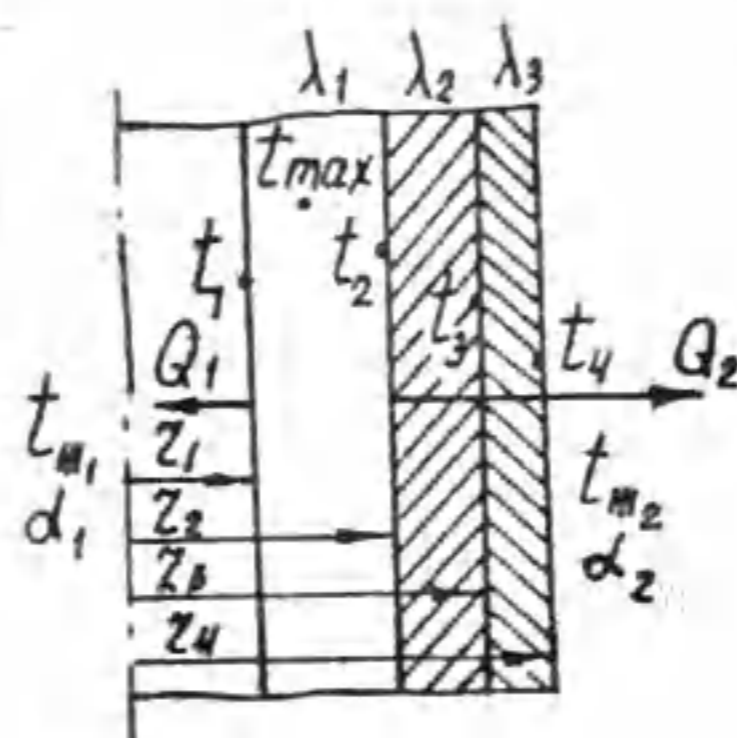
Рассчитать: координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, t_1 , t_2 , $Q_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, $Q_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, t_3 , t_4 .

Задача № 2-24

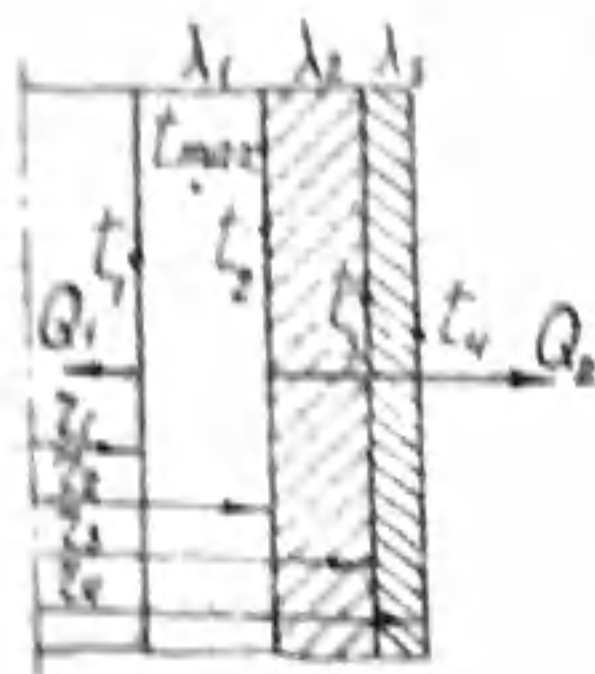
Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим внутренним слоем дано:

$r_1 = 28 \text{ мм}$, $r_2 = 34 \text{ мм}$, $r_3 = 38 \text{ мм}$, $r_4 = 40 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 15 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\lambda_2 = 3 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\lambda_3 = 80 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $q_v = 10^7 \text{ Вт/м}^3$, $\alpha_2 = 100 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°С}$, $t_{m2} = 20^\circ\text{С}$, $Q_1 = 45 \text{ Вт/м}$.

Рассчитать: координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру в тепловыделяющем слое, $Q_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$, t_1 , t_3 , t_4 .



Задача № 2-25

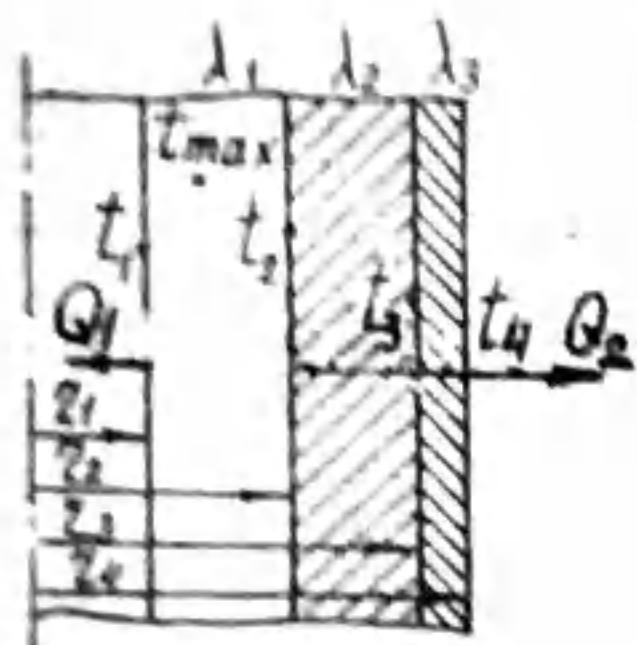


Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим внутренним слоем дано:

$r_1 = 28$ мм, $r_2 = 34$ мм, $r_3 = 36$ мм, $r_4 = 40$ мм, $\lambda_1 = 15$ Вт/м·°С, $\lambda_2 = 3$ Вт/м·°С, $\lambda_3 = 80$ Вт/м·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³, $Q_1 = 3642,4$ Вт/м, $Q_2 = 3038,4$ Вт/м, $t_4 = -50$ °С.

Рассчитать координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, t_1, t_2, t_3 .

Задача № 2-26

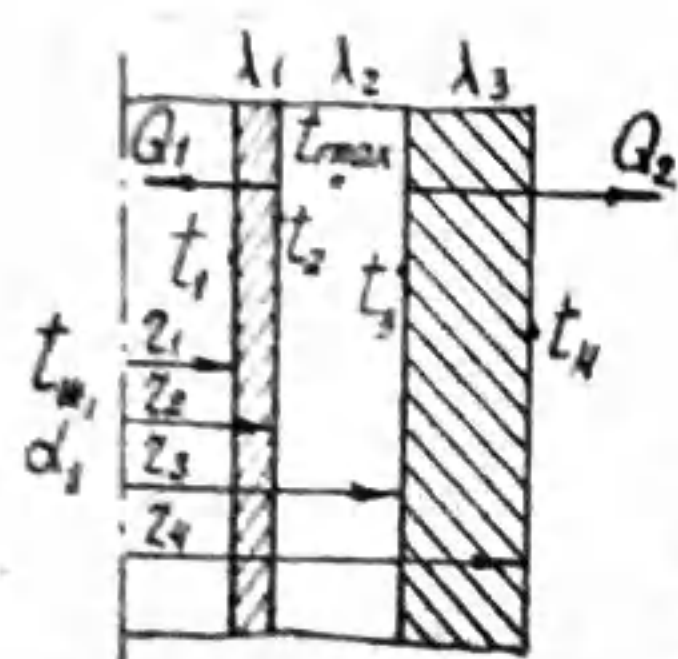


Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим внутренним слоем дано:

$r_1 = 28$ мм, $r_2 = 34$ мм, $r_3 = 38$ мм, $r_4 = 40$ мм, $\lambda_1 = 15$ Вт/м·°С, $\lambda_2 = 3$ Вт/м·°С, $\lambda_3 = 80$ Вт/м·°С, $t_2 = 200$ °С, $t_4 = -50$ °С, $q_v = 10^7$ Вт/м³.

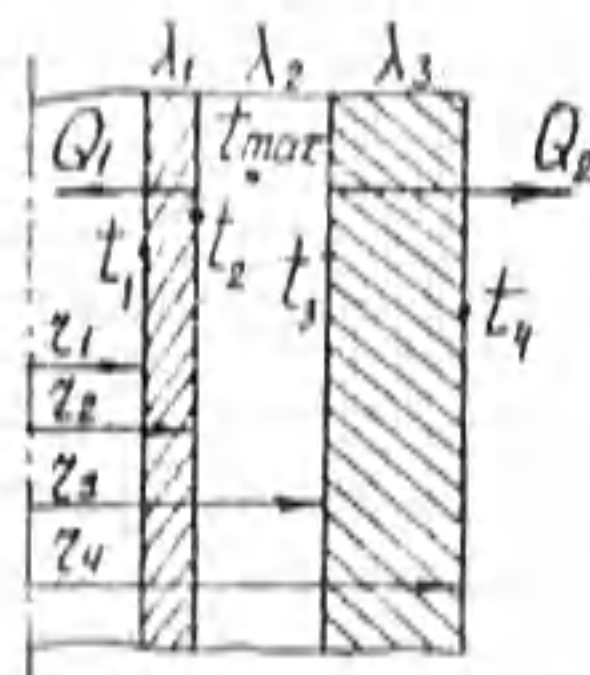
Рассчитать координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, $Q_1, \frac{Q_1}{m}, Q_2, \frac{Q_2}{m}, t_2, t_3$.

Задача № 2-27



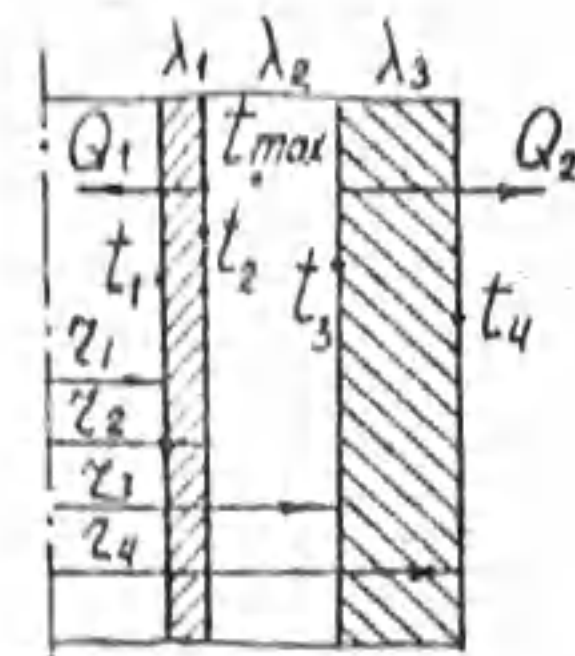
Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим средним слоем дано: $r_1 = 20$ мм, $r_2 = 22$ мм, $r_3 = 30$ мм, $r_4 = 40$ мм, $\lambda_1 = 80$ Вт/м·°С, $\lambda_2 = 15$ Вт/м·°С, $\alpha_1 = 272,8$ Вт/м²·°С, $t_{w1} = 50$ °С, полная теплота, рассеиваемая боковыми поверхностями трехслойной стенки $Q = Q_1 + Q_2 = 13060$ Вт/м, $t_4 = 200$ °С, $\lambda_3 = 3$ Вт/м·°С. Рассчитать: координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, $Q_1, \frac{Q_1}{m}, Q_2, \frac{Q_2}{m}, t_1, t_2, t_3$.

Задача № 2-28



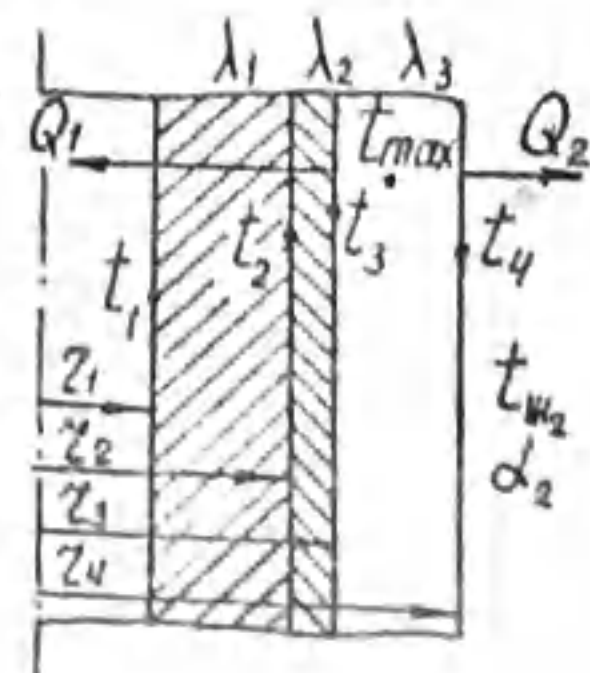
Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим средним слоем дано: $r_1 = 20$ мм, $r_2 = 22$ мм, $r_3 = 30$ мм, $r_4 = 40$ мм, $\lambda_1 = 80$ Вт/м·°С, $\lambda_2 = 15$ Вт/м·°С, $\lambda_3 = 3$ Вт/м·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³, $Q_1 = 7653$ Вт/м, $t_4 = 200$ °С. Рассчитать: координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, $Q_2, \frac{Q_2}{m}, t_1, t_2, t_3$.

Задача № 2-29



Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим средним слоем дано: $r_1 = 20$ мм, $r_2 = 22$ мм, $r_3 = 30$ мм, $r_4 = 40$ мм, $\lambda_1 = 80$ Вт/м·°С, $\lambda_2 = 15$ Вт/м·°С, $\lambda_3 = 3$ Вт/м·°С, $t_1 = 600$ °С, $t_4 = 464,2$ °С, $q_v = 10^7$ Вт/м³. Рассчитать: координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, $Q_1, \frac{Q_1}{m}, Q_2, \frac{Q_2}{m}, t_2, t_3$.

Задача № 2-30



Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим наружным слоем дано: $r_1 = 20$ мм, $r_2 = 30$ мм, $r_3 = 32$ мм, $r_4 = 40$ мм, $\lambda_1 = 3$ Вт/м·°С, $\lambda_2 = 80$ Вт/м·°С, $\lambda_3 = 15$ Вт/м·°С, $t_1 = 522,5$ °С, $t_{w2} = 150$ °С, $\alpha_2 = 93$ Вт/м²·°С, теплота, рассеиваемая с боковых поверхностей трехслойной стенки $Q = Q_1 + Q_2 = 18086,4$ Вт/м. Рассчитать: координату максимальной температуры z_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, $Q_1, \frac{Q_1}{m}, Q_2, \frac{Q_2}{m}, t_2, t_3, t_4$.

Методические указания и задачи для самостоятельной работы по курсу "Тепломассообмен" для студентов теплотехнических специальностей. - Томск: изд. ТПУ, 1994. - 29 с.

Составитель Коновалова Л.С.

Рецензент доц. к.т.н. Фурман А.В.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры теоретической и общей теплотехники 24 июня 1993 года.

Зав. кафедрой



Д.А. Загромов

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Условные обозначения: a , м²/с - коэффициент температуропроводности; c , Дж/кг·°С - теплоемкость; ρ , кг/м³ - плотность; V , м³ - объем; τ , с - время; α , Вт/м²·°С - коэффициент теплоотдачи; t_m , °С - температура среды; $\theta = \frac{t - t_m}{t_n - t_m}$ - безразмерная температура; $\bar{\theta} = \bar{t} - t_m$ - средний перегрев; $\theta_n = t_n - t_m$ - начальный перегрев; q_v , Вт/м³ - плотность внутреннего тепловыделения.

Охлаждение (нагрев) неограниченной пластины

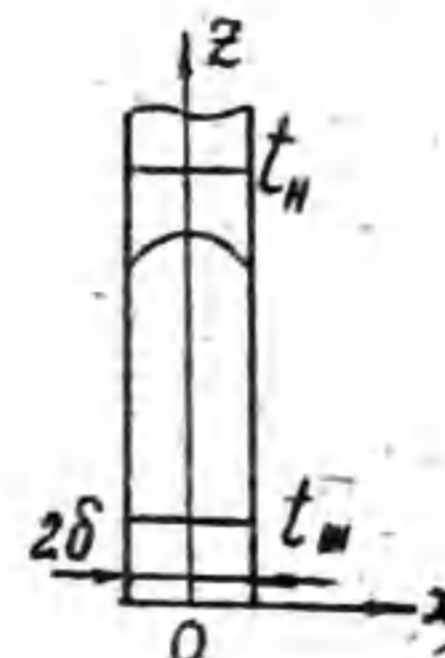


Рис.1

Математическая постановка задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \\ \text{при } \tau=0 \quad t &= t_n, \\ -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=\pm\delta} &= \alpha (t_c - t_m). \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

Решением системы уравнений (I) является уравнение температурного поля в безразмерном виде:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\mu_n X) e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (2)$$

где $X = \frac{x}{\delta}$ - безразмерная координата, $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ - число Фурье, μ_n - корни тригонометрического уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu}{Bi}, \quad (3)$$

$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda}$ - число Био, $A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} = f(Bi)$ коэффициенты.

Значения корней $\mu_n = f(Bi)$ и коэффициенты $A_n = f(Bi)$ для 8 членов ряда (2) приведены в [5].

Средняя температура пластины $\bar{\theta} = \frac{\bar{t} - t_m}{t_n - t_m}$ в каждый момент времени τ может быть вычислена по формуле

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi^2}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)} e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (4)$$

При $Fo > 0.3$ в (2) и (4) можно ограничиться первым членом ряда. При этом обеспечивается достаточная точность результатов расчета.

$$\theta = A_1 \cos(\mu_1 X) e^{-\mu_1^2 Fo}, \quad (5)$$

$$\bar{\theta} = \frac{2Bi^2}{\mu_1^2(\mu_1^2 + Bi^2 + Bi)} e^{-\mu_1^2 Fo} \quad (6)$$

При $Bi < 0.1$ (термически тонкая пластина) средняя температура пластины рассчитывается по более простой формуле

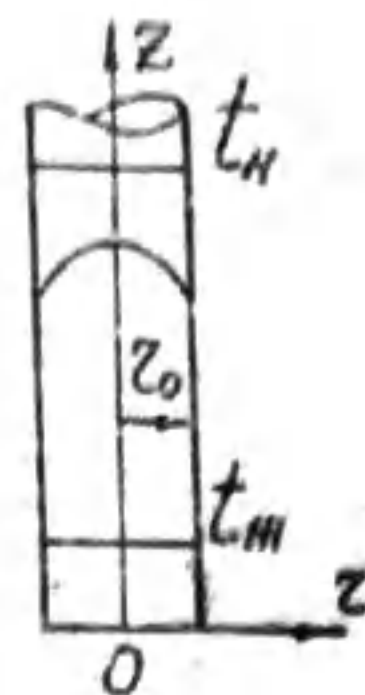
$$\bar{\theta} = e^{-Bi \cdot Fo} \quad (7)$$

и мало отличается от температур в центре ($\theta_{x=0}$) и на поверхности ($\theta_{x=l}$) пластины.

При $Bi > 100$ (интенсивное охлаждение поверхности)

$$\left. \begin{aligned} \theta_{x=l} &\approx 0, \\ \theta_{x=0} &= \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Охлаждение (нагрев) неограниченного цилиндра



Математическая постановка задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial t}{\partial z} \right), \\ \text{при } \tau=0, \quad t &= t_n, \\ -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)_{z=r_0} &= \alpha (t_c - t_n). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Решением системы уравнений (9) является уравнение температурного поля в безразмерном виде

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\mu_n R) e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (10)$$

где $R = \frac{r}{r_0}$ - безразмерная координата, $Fo = \frac{a\tau}{r_0^2}$ - число Фурье, μ_n - корни уравнения

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi} \quad (11)$$

$Bi = \frac{\alpha r_0}{\lambda}$ - число Био, $J_0(\mu)$, $J_1(\mu)$ - функции Бесселя нулевого и первого порядка от действительного аргумента, $A_n = \frac{2 J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} = f(Bi)$ - коэффициенты.

Значения $\mu_n = f(Bi)$, $A_n = f(Bi)$ для 8 членов ряда (10) приведены в [5].

Средняя температура цилиндра

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4Bi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2)} e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (12)$$

При $Fo > 0.3$ в (10) и (12) учитывается только первый член ряда

$$\theta = 1.70 (\mu_1 R) e^{-\mu_1^2 Fo} \quad (13)$$

$$\bar{\theta} = \frac{4Bi^2}{\mu_1^2(\mu_1^2 + Bi^2)} e^{-\mu_1^2 Fo} \quad (14)$$

При $Bi < 0.1$ (термически тонкий цилиндр) средняя температура

$$\bar{\theta} = e^{-2Bi Fo} \quad (15)$$

Расчет тепла

Теплота, отданная телом за время τ в процессе охлаждения или воспринятая за тот же промежуток времени в процессе нагрева, рассчитывается по формуле

$$Q = Q_n (1 - \theta) \quad (16)$$

где Q_n - полная теплота, выделенная или воспринятая за время перехода тела в термическое равновесие со средой.

$$Q_n = c \rho V (t_n - t_m) \quad (17)$$

Охлаждение (нагрев) тел конечных размеров

Для конечных тел правильной формы (рис. 3) безразмерная температура для любой точки равна произведению безразмерных температур этой же точки для бесконечных тел, пересечением которых образовано данное конечное тело.

Для бруса (рис. 3а), образованного пересечением двух бесконечных пластин толщиной $2\delta_x$ и $2\delta_z$, температура ребра

$$\theta_1 = \theta_{x=1} \cdot \theta_{z=1}$$

Для параллелепипеда (рис. 3б), образованного пересечением трех бесконечных пластин толщиной $2\delta_x$, $2\delta_y$, $2\delta_z$, температура в центре грани

$$\theta_2 = \theta_{x=1} \cdot \theta_{y=1} \cdot \theta_{z=1}$$

Для конечного цилиндра (рис. 3в), образованного пересечением бесконечного цилиндра радиусом r_0 и бесконечной пластины толщиной

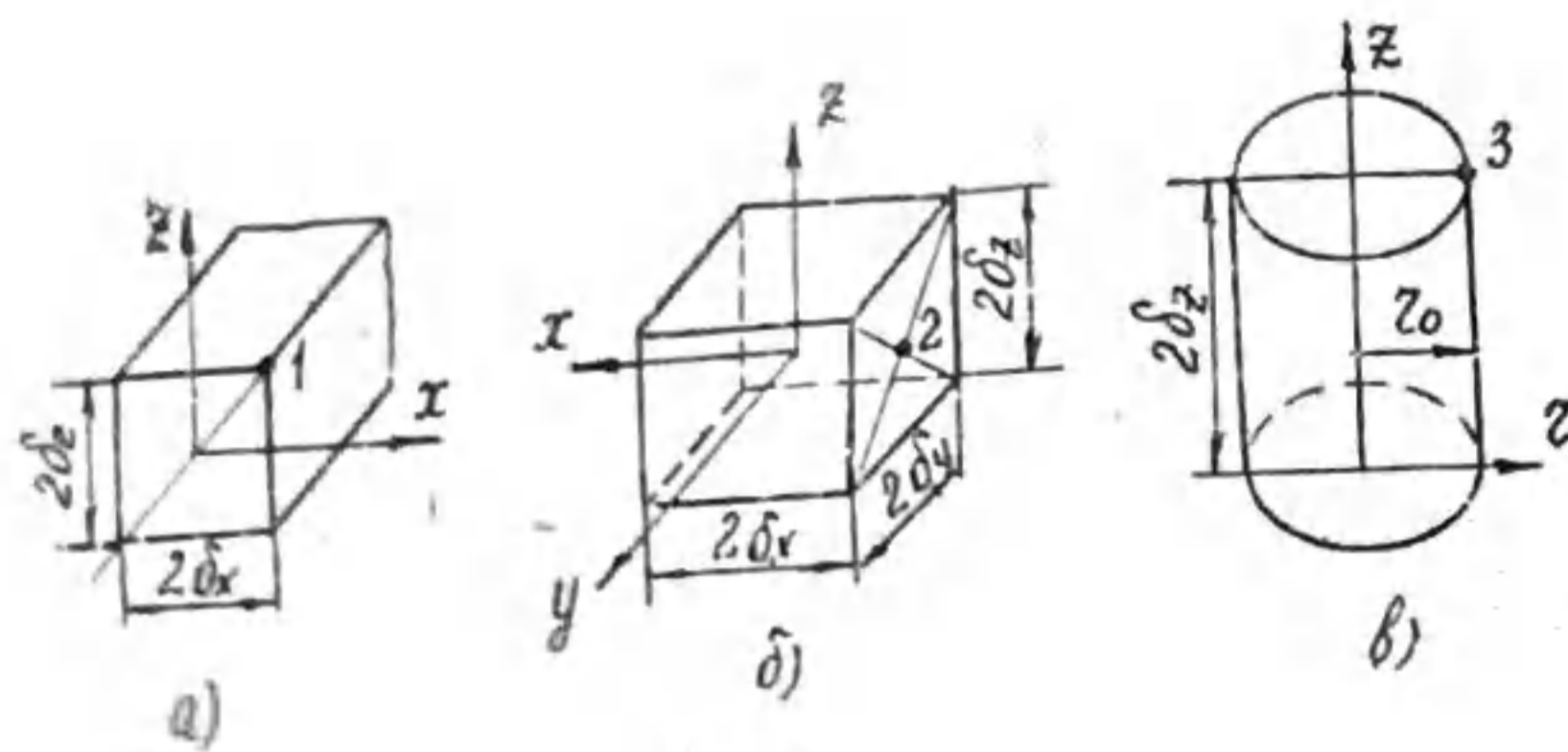


Рис. 3

$2\delta_x$, температура кромки торцевой поверхности

$$\theta_3 = \theta_{R=1} \cdot \theta_{z=1}$$

Для определения безразмерных температур бесконечных тел $\theta_x, \theta_y, \theta_z, \theta_r$ рассчитывают $Fo_x = \frac{\alpha \tau}{\delta_x^2}, Bi_x = \frac{\alpha \delta_x}{\lambda}, Fo_y, Bi_y$ и т.д.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРОВОДНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Для проводников электрического тока (металлы с хорошей теплопроводностью) можно пренебречь изменением температуры по координатам и учитывать только изменение температуры по времени.

Уравнение теплового баланса проводника электрического тока

$$dQ_1 - dQ_2 = dH, \Delta m,$$

где $dQ_1 = q_v V dt$, Дж - Джоулева теплота,

$dQ_2 = \alpha F (\bar{t} - t_m) dt$, Дж - теплота, рассеиваемая поверхностью охлаждения F в окружающую среду,

$dH = c p V dt$, Дж - увеличение энтальпии проводника при прогреве,

и начальное условие является математической постановкой задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{\vartheta}}{\partial \tau} + \frac{\alpha F}{c p V} \bar{\vartheta} &= \frac{q_v}{c p} \\ \text{при } \tau=0 \quad \bar{\vartheta} &= \bar{\vartheta}_H \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Решением системы уравнений (18) является уравнение температурного поля

$$\bar{\vartheta} = \left(\bar{\vartheta}_H - \frac{q_v V}{\alpha F} \right) e^{-\frac{\alpha F \tau}{c p V}} + \frac{q_v V}{\alpha F} \quad (19)$$

При $t_H = t_m$ ($\vartheta_H = 0$)

$$\bar{\vartheta} = \frac{q_v V}{\alpha F} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F \tau}{c p V}} \right) \quad (20)$$

Для термически тонких тел без внутренних источников тепла ($q_v = 0$) из (19) следует

$$\bar{\vartheta} = \bar{\vartheta}_H e^{-\frac{\alpha F \tau}{c p V}} \quad (21)$$

Безразмерный вид этой формулы для бесконечной пластины - (7), для бесконечного цилиндра - (15). Формула (21) в отличие от (7) и (15), применима для тела любой формы, и в этом ее преимущество.

Метод тепловых балансов

Метод тепловых балансов является численным методом расчета температурного поля тел. Сущность метода рассмотрим на примере.

Дано: Труба конечных размеров (рис. 4, а), имеющая начальную температуру t_H , охлаждается в среде с температурой t_m . Теплофизические свойства материала трубы λ, c, ρ , а также коэффициент теплоотдачи в процессе охлаждения α принять постоянными.

Рассчитать температурное поле трубы через время τ после начала охлаждения.

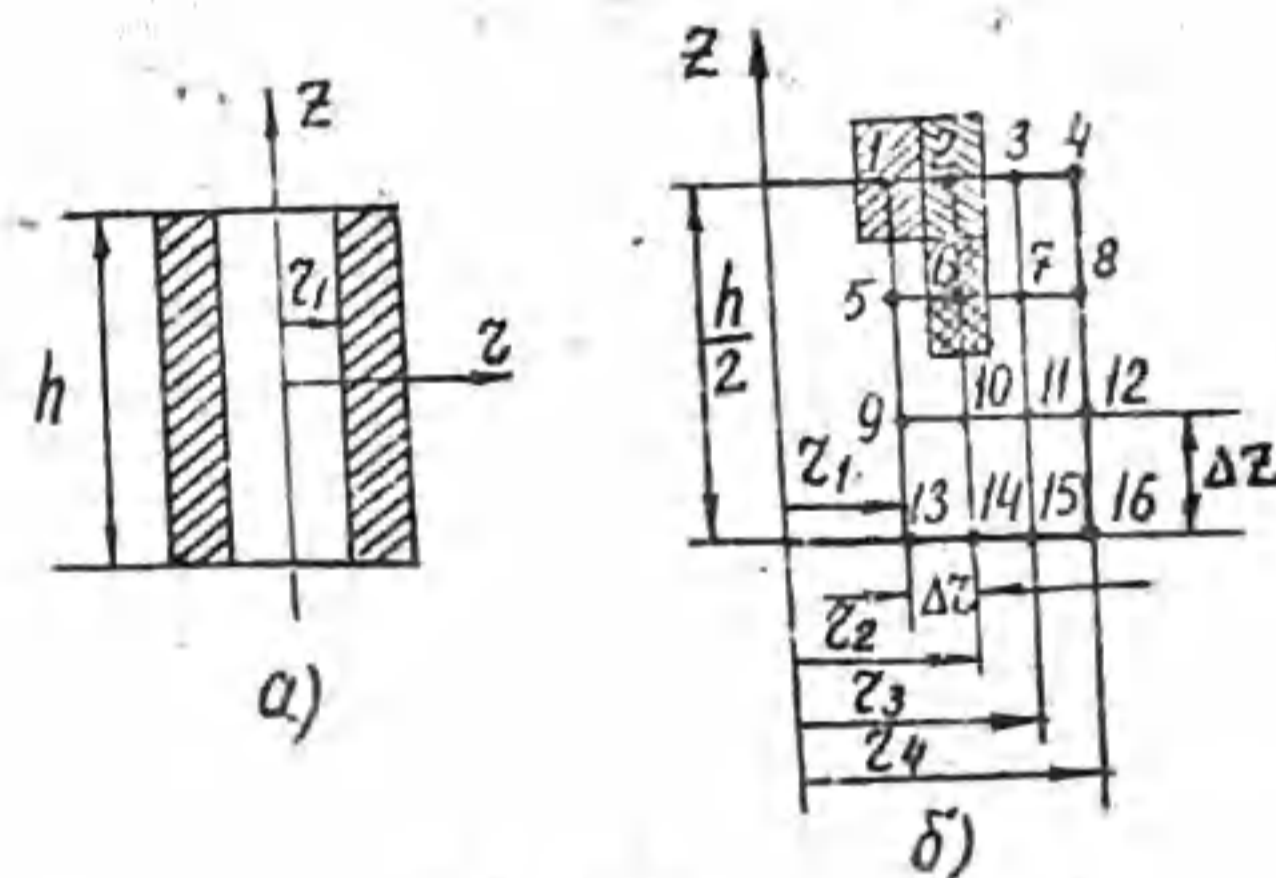


Рис. 4

Вследствие симметрии температурного поля трубы относительно осей Z и Z , рассмотрим температурное поле 1/4 части трубы (рис. 4, б). Разделим стенку трубы с помощью отрезков Δz и Δr на элементарные объемы (кольца прямоугольного сечения). Полученные точки пересечения 1, 2, 3...16 являются расчетными. Каждая из этих точек лежит в

в центре некоторого элементарного объема (Д) (точки 1, 2, 6 сечения этих объемов заштрихованы).

Для каждого элементарного объема с расчетной точкой в центре можно записать уравнение теплового баланса

$$Q_{z-\Delta z} + Q_{z+\Delta z} + Q_{z-\Delta z} + Q_{z+\Delta z} = c\rho V (t_{z+\Delta z} - t_z),$$

т.е. алгебраическая сумма потоков тепла, поступающего через все поверхности в элементарный объем за промежуток времени $\Delta \tau$, изменяет энтропию (теплосодержание) объема.

Тепловые потоки в элементарный объем могут передаваться теплопроводностью

$$dQ_z = -\lambda F_z \frac{dt}{dz} dz, \quad dQ_z = -\lambda F_z \frac{dt}{dz} dz$$

или конвекцией

$$dQ_z = \alpha (t_w - t) F_z dz, \quad dQ_z = \alpha (t_w - t) F_z dz$$

Заменяя дифференциалы dt , dz , dz , dz конечными разностями Δt , Δz , Δz , Δz , запишем уравнения теплового баланса для нескольких элементарных объемов с расчетными точками внутри.

С точкой 6:

$$\lambda F_1 \frac{t_5 - t_6}{\Delta z} \Delta \tau + \lambda F_2 \frac{t_7 - t_6}{\Delta z} \Delta \tau + \lambda F_3 \frac{t_{10} - t_6}{\Delta z} \Delta \tau + \lambda F_3 \frac{t_2 - t_6}{\Delta z} \Delta \tau = c\rho V (t'_6 - t_6),$$

$$F_1 = 2\pi (r_2 - \frac{\Delta z}{2}) \Delta z, \quad F_2 = 2\pi (r_2 + \frac{\Delta z}{2}) \Delta z,$$

$$F_3 = \pi [(r_2 + \frac{\Delta z}{2})^2 - (r_2 - \frac{\Delta z}{2})^2], \quad V = F_3 \cdot \Delta z.$$

Аналогичные уравнения запишутся для элементарных объемов с точками 7, 10, 11, 14, 15.

С точкой 1:

$$\alpha F_1 (t_w - t_1) \Delta \tau + \lambda F_2 \frac{t_2 - t_1}{\Delta z} \Delta \tau + \lambda F_3 \frac{t_5 - t_1}{\Delta z} \Delta \tau + \alpha F_3 (t_w - t_1) \Delta \tau = c\rho V (t'_1 - t_1),$$

$$F_1 = 2\pi r_1 \frac{\Delta z}{2}, \quad F_2 = 2\pi (r_1 + \frac{\Delta z}{2}) \frac{\Delta z}{2},$$

$$F_3 = \pi [(r_1 + \frac{\Delta z}{2})^2 - r_1^2], \quad V = F_3 \cdot \frac{\Delta z}{2}.$$

Аналогичное уравнение запишется для элементарного объема с точкой

С точкой 2:

$$\lambda F_1 \frac{t_1 - t_2}{\Delta z} \Delta \tau + \lambda F_2 \frac{t_3 - t_2}{\Delta z} \Delta \tau + \lambda F_3 \frac{t_6 - t_2}{\Delta z} \Delta \tau + \alpha F_3 (t_w - t_2) \Delta \tau =$$

$$= c\rho V (t'_2 - t_2), \quad F_1 = 2\pi (r_2 - \frac{\Delta z}{2}) \frac{\Delta z}{2},$$

$$F_2 = 2\pi (r_2 + \frac{\Delta z}{2}) \frac{\Delta z}{2}, \quad F_3 = \pi [(r_2 + \frac{\Delta z}{2})^2 - (r_2 - \frac{\Delta z}{2})^2],$$

$$V = F_3 \cdot \frac{\Delta z}{2}.$$

Аналогичное уравнение запишется для элементарного объема с точкой 3.

По такому же принципу могут быть составлены уравнения для оставшихся элементарных объемов с точками 5, 9, 13, 8, 12, 6.

Полученные уравнения для 16 элементарных объемов записывают относительно температур t'_1, t'_2 и т.д.

$$\left. \begin{aligned} t'_1 &= a_1 t_w + a_2 t_2 + a_3 t_5 + a_4 t_1, \\ t'_2 &= a'_1 t_w + a'_2 t_1 + a'_3 t_3 + a'_4 t_6 + a'_5 t_2, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

и т.д.

Системе алгебраических уравнений (22) является основой численного метода расчета нестационарного температурного поля.

В начальный момент времени ($\tau = 0$) все температуры t_{1-16} одинаковы и равны t_w . По уравнениям (22) рассчитывают температуры t'_{1-16} через время $\Delta \tau$ после начала охлаждения трубы. При втором расчете в правую часть уравнений (22) подставляют значения температур t'_{1-16} , полученные в первом расчете и т.д. Расчеты повторяют $K = \tau / \Delta \tau$ раз, т.е. до интересующего нас момента времени τ .

Из каких соображений выбрать шаги по координатам Δz , Δz и по времени $\Delta \tau$?

Как показывает анализ, устойчивость системы уравнений (22) обеспечивается при условии: а) для одномерных задач при $F_0 = \frac{\rho \Delta \tau}{\lambda \Delta x^2} \leq 0,5$; б) для двумерных задач при $F_0 \leq 0,25$.

Бесспорно одно, чем меньше шаги по координатам и времени, тем точнее расчет.

Метод тепловых балансов позволяет рассчитывать нестационарные и стационарные температурные поля бесконечных и конечных тел, однослойных и многослойных стенок, с внутренними и без внутренних источников тепла. Этот метод позволяет учесть зависимость теплофизических свойств (λ, c_p, ρ) от температуры, переменность коэффициента теплоотдачи (α) и температуры среды (t_w) во времени.

Пример решения задачи

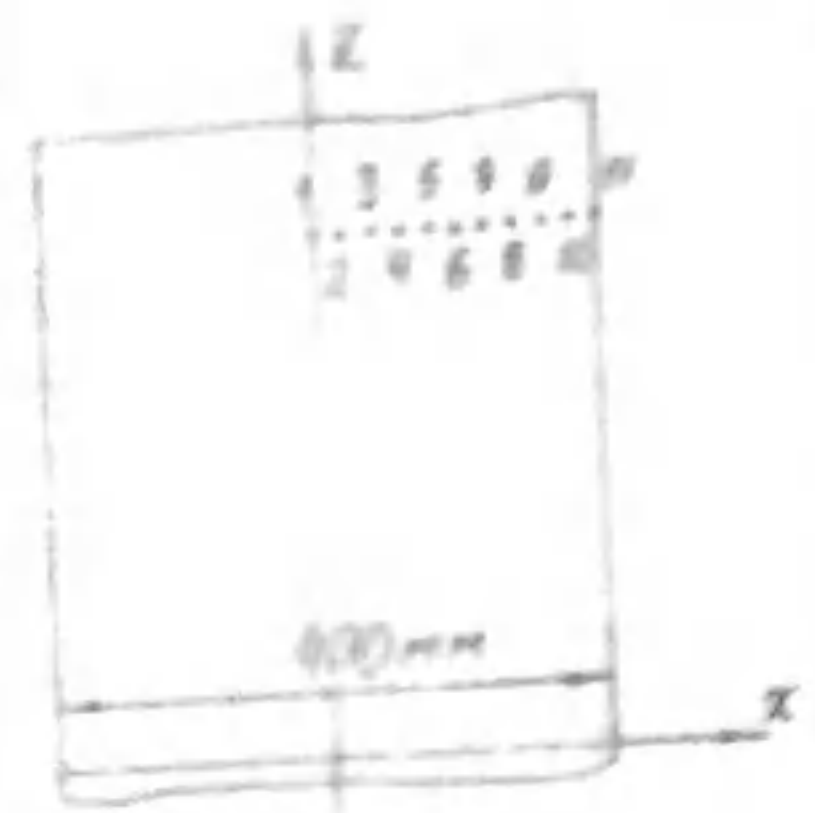


Рис. 5

Плита из бронзы ($\lambda = 64 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, $\rho = 8000 \text{ кг/м}^3$, $c = 381 \text{ Дж/кг}^\circ\text{С}$) неограниченной протяженности толщиной 400 мм, имеющая начальную температуру 900°С , охлаждается в среде с $t_m = 20^\circ\text{С}$. Коэффициент теплоотдачи на поверхности плиты в процессе охлаждения $\alpha = 160 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{С}$. Рассчитать температурное поле плиты (температуры в точках с координатами $X = 0; 0,1; 0,2$ и т.д. до $X = 1$) через $T = 10$ мин. после начала ее охлаждения:
 а) используя уравнение температурного поля (2);

используя метод тепловых балансов и теплоту, переданную за $T = 10$ мин с 1 м^2 поверхности плиты в окружающую среду (q).

Решение

Коэффициент температуропроводности бронзы

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{64}{381 \cdot 8000} = 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Число Биотта и Фурье

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} = \frac{160 \cdot 0,2}{64} = 0,5, \quad Fo = \frac{aT}{\delta^2} = \frac{2,1 \cdot 10^{-5} \cdot 600}{0,2^2} = 0,315$$

Так как $Fo > 0,3$, для расчета температур в указанных точках используем уравнение

$$\theta_i = A_i \cos(\mu_i x_i) e^{-\mu_i^2 Fo}$$

$$\theta_i = \frac{t_i - t_m}{t_n - t_m},$$

где $\mu_1 = 0,6491$, $A_1 = 1,0697$ взяты из [6] для безграничной пластины при $Bi = 0,5$. Полученные температуры t_1, t_{II} приведены в табл. I.

Теплота, переданная за 10 мин охлаждения плиты в окружающую среду с 1 м^2 поверхности

$$q = q_n (1 - \bar{\theta}).$$

Полная теплота, выделенная 1 м^2 поверхности плиты в процессе ее охлаждения до температуры окружающей среды,

$$q_n = \frac{Q_n}{F_{0n}} = \frac{c\rho V}{F_{0n}} (t_n - t_m) = \frac{c\rho 2\delta F}{2F} (t_n - t_m) =$$

$$= c\rho\delta (t_n - t_m) = 381 \cdot 8000 \cdot 0,2 (900 - 20) = 5,36 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$$

Средняя температура плиты $\bar{\theta}$ на указанный момент времени согласно (6)

$$\bar{\theta} = \frac{2 \cdot 0,5^2}{0,6491^2 (0,6491^2 + 0,5^2 + 0,5)} \cdot e^{-0,6491^2 \cdot 0,315} = 0,887$$

Тогда

$$q = 536 (1 - 0,887) = 60,5 \text{ МДж/м}^2$$

Численный метод расчета температурного поля

Шаг по координате x составляет $\Delta x = \frac{0,2}{10} = 0,02 \text{ м}$, шаг по времени принимаем $\Delta T = 5 \text{ с}$. При этом

$$Fo = \frac{a\Delta T}{\Delta x^2} = \frac{2,1 \cdot 10^{-5} \cdot 5}{0,02^2} = 0,2625 < 0,5,$$

т.е. устойчивость системы расчетных уравнений обеспечивается.

Точки 2,3,4...10 расположены внутри элементарного объема толщиной Δx . Через боковые поверхности f этого объема теплота передается теплопроводностью, и через каждый промежуток времени $\Delta T = 5 \text{ с}$ температура этих точек t_i снижается до t_i' .

Для точки 2:

$$\lambda \frac{t_1 - t_2}{\Delta x} f \Delta T + \lambda \frac{t_3 - t_2}{\Delta x} f \Delta T = c\rho V (t_2' - t_2),$$

для точки 3:

$$\lambda \frac{t_2 - t_3}{\Delta x} f \Delta T + \lambda \frac{t_4 - t_3}{\Delta x} f \Delta T = c\rho V (t_3' - t_3).$$

Аналогично запишутся уравнения для точек 4,5...10.

Точка I относится к половине элементарного объема, из которого тепло передается теплопроводностью через одну боковую поверхность f ,

$$\lambda \frac{t_2 - t_I}{\Delta x} f \Delta T = c\rho \frac{V}{2} (t_I' - t_I).$$

Точка II относится к половине элементарного объема, в котором с одной стороны тепло передается теплопроводностью, с другой стороны отводится конвекцией

$$\lambda \frac{t_{10} - t_{II}}{\Delta x} f \Delta T + \alpha f (t_m - t_{II}) \Delta T = c\rho \frac{V}{2} (t_{II}' - t_{II}).$$

Примем $f = 1 \text{ м}^2$, тогда $V = f \Delta x = \Delta x, \text{ м}^3$.

Уравнения, записанные для II точек, разрешим относительно температур $t'_i - t''_i$. Получим систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} t'_1 &= 2Fot_2 + (1-2Fo)t_1, \\ t'_2 &= Fot_1 + Fot_3 + (1-Fo)t_2, \\ t'_3 &= Fot_2 + Fot_4 + (1-2Fo)t_3, \\ t'_4 &= Fot_3 + Fot_5 + (1-2Fo)t_4, \\ t'_5 &= Fot_4 + Fot_6 + (1-2Fo)t_5, \\ t'_6 &= Fot_5 + Fot_7 + (1-2Fo)t_6, \\ t'_7 &= Fot_6 + Fot_8 + (1-2Fo)t_7, \\ t'_8 &= Fot_7 + Fot_9 + (1-2Fo)t_8, \\ t'_9 &= Fot_8 + Fot_{10} + (1-2Fo)t_9, \\ t'_{10} &= Fot_9 + Fot_{11} + (1-2Fo)t_{10}, \\ t''_{11} &= 2Fot_{10} + (1-2Fo)Bi - 2Fo)t_{11} + 2FoBi t''_{11}, \end{aligned} \quad (23)$$

где $Fo = \frac{q\tau}{\Delta x^2}$, $Bi = \frac{\alpha \Delta x}{\lambda}$.

Чтобы найти температуры в точках I-II через $\tau = 10$ мин после начала охлаждения плиты, необходимо произвести расчет температур $t'_i - t''_i$ по уравнениям (23) $\tau/\Delta\tau = 600/5 = 120$ раз.

При первом расчете вместо температур $t'_i - t''_i$ подставляется начальная температура t_n , при втором расчете - полученные температуры первого расчета и т.д. Результаты численного расчета температур приведены в табл. I.

Таблица I

Точки	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
$t, ^\circ\text{C}$	844,3	842,6	837,4		816,7		782,6		735,7		676,7
$\rho_0(B)-(5)$			828,8			801,3		760,7		707,6	
$t, ^\circ\text{C}$	840,92		834,42		814,82		781,91		735,61		676,23
Числ.		839,30		826,27		800,04		760,42		707,51	

Из табл. I следует, что совпадение температур достаточно хорошее.

ЗАДАЧИ

Указание. Номограммами $\theta_{x=0} = f_1(Bi, Fo)$, $\theta_{x=L} = f_2(Bi, Fo)$, $\theta_{x=0} = f_3(Bi, Fo)$, $\theta_{x=L} = f_4(Bi, Fo)$ для нахождения температур не пользоваться. Исключение составляют только те задачи, при решении которых

номограммы могут облегчить предварительную оценку искомой величины (в примечаниях к этим задачам даны рекомендации по использованию номограмм).

Задача № I-1

Резиновый лист толщиной 40 мм, нагретый до температуры 150°C , помещен в воздушную среду с температурой 15°C .

Определить температуру на поверхности и в середине листа через 30 минут после начала охлаждения. Теплопроводность резины $\lambda = 0,17$ Вт/м $^\circ\text{C}$, коэффициент температуропроводности $a = 8,3 \cdot 10^{-8}$ м 2 /с, коэффициент теплоотдачи на поверхности пластины $\alpha = 27$ Вт/м $^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Через какое время τ температура в середине пластины достигнет 25°C ?

Задача № I-2

Определить время охлаждения листа стали толщиной 10 мм от начальной температуры 600°C до температуры, отличающейся от температуры окружающей среды на 1 градус.

Температура среды 20°C . Теплофизические характеристики стали: $\lambda = 45$ Вт/м $^\circ\text{C}$, $c = 0,46$ кДж/кг $^\circ\text{C}$, $\rho = 7900$ кг/м 3 , коэффициент теплоотдачи на поверхности листа $\alpha = 35$ Вт/м $^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Задача № I-3

Плита толщиной 300 мм имеет температуру 150°C . С момента начала охлаждения плита с одной стороны омывается воздухом с $t_n = 20^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 30$ Вт/м $^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Определить количество теплоты, теряемое площадью 1 м 2 поверхности плиты за 1 час охлаждения, а также температуру поверхности плиты к этому моменту времени. Теплопроводность материала плиты $\lambda = 0,4$ Вт/м $^\circ\text{C}$, коэффициент температуропроводности $a = 3 \cdot 10^{-7}$ м 2 /с.

Примечание: Теплообменом с другой стороны плиты пренебречь.

Задача № I-4

Определить, какую минимальную толщину должна иметь стенка дозвукового сопла для того, чтобы за 6 сек. работы двигателя температура поверхности, омываемой газами с температурой 2250°C , не превышала допустимого значения 1250 К. Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha = 870$ Вт/м $^2 \cdot ^\circ\text{C}$, теплофизические свойства материала: $\lambda = 35$ Вт/м $^\circ\text{C}$, $a = 1,4 \cdot 10^{-5}$ м 2 /с; начальная температура сопла 300 К.

Примечание: Стенку рассматривать как плоскую неограниченную пластину, отводом теплоты с наружной поверхности сопла пренебречь.

Удобно воспользоваться номограммой для предварительной оценки искомой величины, которая затем должна быть уточнена расчетным уравнением.

Задача № I-5

Сопло двигателя имеет вкладыш из графита толщиной 20 мм. Внутренняя поверхность вкладыша омывается газами с $t_* = 2500^\circ\text{C}$. На наружной поверхности — адиабатные условия.

До какой температуры нагреется внутренняя поверхность вкладыша за 7 секунд после начала работы двигателя, если считать стенку вкладыша плоской стенкой неограниченной протяженности? Каков перепад температур по толщине стенки графита на этот момент?

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha = 3500 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, начальная температура вкладыша 20°C , теплофизические свойства графита: $\lambda = 147 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, $a = 110 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача № I-6

Стальная плита неограниченной протяженности толщиной 200 мм равномерно прогретая до температуры 250°C , помещена в воздушную среду с температурой 15°C . Коэффициент теплоотдачи на поверхностях плиты $\alpha = 30 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, теплопроводность стали $\lambda = 45 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, коэффициент температуропроводности $a = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Определить температуры в середине, на поверхности плиты и на расстоянии 50 мм от середины плиты через 1 час после начала охлаждения.

Задача № I-7

Лист толщиной 20 мм, изготовленный из электроизоляционного материала, помещен в нагревательную печь, температура воздуха в которой равна 450°C , коэффициент теплоотдачи к поверхности листа $\alpha = 40 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Определить время прогрева листа до $t = 200^\circ\text{C}$, если его начальная температура равнялась 20°C . Теплопроводность материала $\lambda = 0,174 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, коэффициент температуропроводности $a = 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$.

Примечание: Временем прогрева считать момент достижения заданной температуры в середине пластины.

Задача № I-8

Лист толщиной 20 мм, изготовленный из электроизоляционного материала и имеющий начальную температуру 20°C , помещен в нагревательную печь, температура воздуха в которой равна 450°C .

Определить коэффициент теплоотдачи на поверхности листа, если температура этой поверхности достигла 250°C через 0,5 ч. Теплопроводность материала $\lambda = 0,174 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, коэффициент температуропроводности $a = 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$.

Примечание: В данной задаче удобно воспользоваться номограммой для предварительной оценки искомой величины, которая затем должна быть уточнена расчетным уравнением.

Задача № I-9

Сопло ракетного двигателя изготовлено из легированной стали толщиной 2 мм. Теплофизические свойства стали: $\lambda = 17 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, $c = 0,5 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$, $\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$. На наружной поверхности сопла — адиабатные условия, внутренняя поверхность омывается газами. Диаметр сопла $d \gg \delta = 2 \text{ мм}$.

Найти среднюю температуру стенки сопла и перепад температур по толщине стенки через 5,5 с после начала работы двигателя. Начальная температура стенки сопла 0°C , температура газов 2800 К , коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $500 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Задача № I-10

Большая плита из нержавеющей стали ($\lambda = 30 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, $a = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$) толщиной 0,3 м выходит из прокатного стана, имея постоянную температуру 800°C . Плита охлаждается с обеих сторон высокоскоростными воздушными струями. Температура воздуха 30°C , коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha = 500 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. На поверхность плиты нужно положить слой пластиковой теплоизоляции, но температура поверхности стальной плиты при этом не должна превышать 200°C .

Определить минимальное время, в течение которого нужно обдувать плиту, чтобы можно было положить слой изоляции.

Задача № I-11

Стальная пластина имеет постоянную температуру 300°C . Пластину нужно охладить воздухом с температурой 50°C , омывающим одну ее сторону. Толщина пластины 10 см, $a = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\alpha = 400 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $\lambda = 40 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$.

Сколько времени нужно поверхность пластины обдувать воздухом, что-

бы температура ее поверхности понизилась до 200°C ? Каковы температуры на расстоянии 1 и 10 см от обдуваемой поверхности в момент времени, когда температура обдуваемой поверхности достигнет 200°C ?

Задача № I-12

Длинный чугунный цилиндр диаметром $d = 0,2$ м ($\lambda = 70$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ м 2 /с) имеет начальную температуру 400°C . Наружная поверхность цилиндра охлаждается воздухом с температурой 50°C при коэффициенте теплоотдачи $\alpha = 420$ Вт/м $^2 \cdot^{\circ}\text{C}$.

Найти максимальную температуру (t_{max}) цилиндра и перепад температур (Δt) после его охлаждения воздухом в течение 20 мин.

Каким будет перепад температур ($\Delta t'$) через 40 мин охлаждения цилиндра воздухом?

Задача № I-13

Длинные металлические стержни ($\lambda = 45$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ м 2 /с) диаметром $d = 0,05$ м помещены в печь для термической обработки. Температура в печи 600°C , начальная температура стержней 60°C .

Сколько времени стержни должны оставаться в печи, чтобы их средняя температура достигла 400°C ? Каков перепад температур в стержне? Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 120$ Вт/м $^2 \cdot^{\circ}\text{C}$.

Задача № I-14

Телефонные столбы пропитывают смолистым составом, чтобы предотвратить их гниение. Пропитка происходит при повышенных температурах и давлениях. Столб диаметром 0,3 м, имеющий начальную температуру 20°C , помещают в печь и вынимают, когда он просмолился на глубину 10 см. Установлено, что температура на глубине 10 см составляет 100°C .

Найти время выдерживания столба в печи, если температура в ней 350°C , $\alpha = 145$ Вт/м $^2 \cdot^{\circ}\text{C}$. Теплофизические свойства дерева: $\lambda = 0,2$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-7}$ м 2 /с.

а Задача № I-15

Длинный стальной вал диаметром 200 мм, имевший начальную температуру 15°C , помещен в печь с температурой 1100°C .

Определить коэффициент теплоотдачи, если после 1 часа нагрева температура на оси вала достигла 850°C . Определить также температуру на поверхности вала в этот момент времени. Теплопроводность материала $\lambda = 18$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$, коэффициент температуропроводности $\alpha = 6,12 \cdot 10^{-6}$ м 2 /с.

Примечание: В данной задаче удобно воспользоваться номограммой для предварительной оценки искомой величины, которая затем должна быть уточнена расчетным уравнением.

Задача № I-16

Длинный стальной вал диаметром 200 мм, имевший начальную температуру 15°C , помещен в печь с температурой 1100°C .

Определить время нагрева вала, считая процесс законченным при температуре оси вала 850°C . Определить также температуру на поверхности вала в конце нагрева.

Коэффициент теплоотдачи на поверхности вала $\alpha = 120$ Вт/м $^2 \cdot^{\circ}\text{C}$, теплопроводность $\lambda = 18$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$, коэффициент температуропроводности $\alpha = 6,12 \cdot 10^{-6}$ м 2 /с.

Задача № I-17

Стальной брусок с размерами боковых граней 40 мм и 80 мм, имеющий начальную температуру 700°C , погружается в жидкий воздух ($t_{ж} = -183^{\circ}\text{C}$). Для стали: $\lambda = 35$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 1,11 \cdot 10^{-5}$ м 2 /с. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 580$ Вт/м $^2 \cdot^{\circ}\text{C}$.

За какое время τ после погружения средняя температура бруска снизится до 0°C ?

Задача № I-18

Стальной брусок с размерами боковых граней 40 мм и 80 мм, имеющий начальную температуру 700°C , погружается в жидкий воздух ($t_{ж} = -183^{\circ}\text{C}$). Для стали: $\lambda = 35$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 1,11 \cdot 10^{-5}$ м 2 /с. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 580$ Вт/м $^2 \cdot^{\circ}\text{C}$.

Определить долю теплоты Q/Q_n , переданной от бруска жидкому воздуху за 5 минут после погружения?

Задача № I-19

Стальной брусок сечением 40x80 мм, имеющий начальную температуру 400°C , погружается в жидкий воздух ($t_{ж} = -183^{\circ}\text{C}$). Для стали: $\lambda = 35$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 1,11 \cdot 10^{-5}$ м 2 /с. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 580$ Вт/м $^2 \cdot^{\circ}\text{C}$.

Какими будут максимальная и минимальная температура бруска через 5 минут после погружения?

Задача № I-20

Стальной брусок сечением 40x80 мм, имеющий начальную температуру 600°C, погружается в жидкий воздух ($t_{\infty} = -183^{\circ}\text{C}$).

Для стали: $\lambda = 35 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 1,11 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 560 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$.

Каковы будут температуры в середине боковых граней бруска через 5 минут после погружения?

Задача № I-21

Стальной цилиндр диаметром 100 мм и длиной 150 мм, равномерно нагретый до температуры 800°C, охлаждается на воздухе, температура которого 20°C.

Определить через какое время τ средняя температура цилиндра будет равной 170°C.

Коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра $\alpha = 120 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, теплопроводность материала $\lambda = 25 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, коэффициент температуропроводности $\alpha = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача № I-22

Стальной цилиндр диаметром 100 мм и длиной 150 мм, равномерно нагретый до температуры 800°C, охлаждается в воздухе, температура которого $t_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$.

Определить максимальную и минимальную температуры цилиндра через 20 минут после начала охлаждения.

Коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра $\alpha = 120 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, теплопроводность материала $\lambda = 25 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, коэффициент температуропроводности $\alpha = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача № I-23

Стальной цилиндр диаметром 100 мм и длиной 150 мм, равномерно нагретый до температуры 800°C, охлаждается в воздухе, температура которого 20°C.

Определить температуры в середине торцевой поверхности (t_r) и в середине боковой поверхности (t_g) цилиндра через 20 минут после начала его охлаждения.

Коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра $\alpha = 120 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, теплопроводность материала $\lambda = 25 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, коэффициент температуропроводности $\alpha = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача № I-24

Стальной цилиндр диаметром 100 мм и длиной 150 мм, равномерно нагретый до температуры 800°C, охлаждается на воздухе, температура которого 20°C.

Определить количество тепла, переданное в окружающую среду в процессе охлаждения цилиндра до температуры воздуха. Какое количество тепла воспримет окружающий воздух за 20 мин охлаждения цилиндра?

Коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра $\alpha = 120 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, теплопроводность материала $\lambda = 25 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, коэффициент температуропроводности $\alpha = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача № I-25

Заготовка в форме куба со стороной 500 мм имела начальную температуру 20°C. Заготовка помещена в нагревательную печь с температурой среды 1200°C. Коэффициент теплоотдачи к поверхности заготовки $\alpha = 140 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, теплофизические характеристики материала: $\lambda = 37 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Определить температуру в центре боковых граней заготовки через 1 час после начала нагревания.

Задача № I-26

Заготовка в форме куба со стороной 400 мм имела начальную температуру 15°C. Заготовка помещена в нагревательную печь с температурой среды 1500°C. Коэффициент теплоотдачи к поверхности заготовки $\alpha = 120 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, теплофизические характеристики материала: $\lambda = 37 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Определить максимальную и минимальную температуры заготовки через 1,2 часа после начала нагревания.

Задача № I-27

Заготовка в форме куба со стороной 400 мм имела начальную температуру 15°C. Заготовка помещена в нагревательную печь с температурой среды 1500°C. Коэффициент теплоотдачи к поверхности заготовки $\alpha = 120 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, теплофизические характеристики материала: $\lambda = 37 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Определить, через какое время τ средняя температура заготовки будет равной 1000°C.

Задача № I-28

Заготовка в форме куба со стороной 400 мм имела начальную темпе-

ратуру 15°C . Заготовка помещена в нагревательную печь с температурой среды 1500°C . Коэффициент теплоотдачи к поверхности заготовки $\alpha = 120 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, теплофизические характеристики материала: $\lambda = 37 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $a = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Определить количество тепла, воспринятое заготовкой в процессе ее прогрева до температуры печи. Какое количество тепла воспримет заготовка за 1,2 часа после начала нагревания?

• Задача № I-29

Бетонный цилиндр диаметром 10 см и длиной 25 см имеет начальную температуру 90°C . Он охлаждается в воздухе при температуре 10°C .

За какое время температура в его центре достигнет 30°C ?

Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 18 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, теплофизические свойства бетона: $\lambda = 1,28 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $c = 1,13 \text{ кДж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$.

Задача № I-30

Короткий алюминиевый цилиндр диаметром 0,6 м и длиной 0,6 м имеет начальную температуру 200°C . Его помещают в среду с температурой 70°C ($\alpha = 85 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$).

Рассчитать температуру в точках цилиндра, расположенных по окружности радиусом 10 см на расстоянии 10 см от его торца через 1 час после начала охлаждения.

Теплофизические свойства алюминия: $\lambda = 202 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $c = 0,92 \text{ кДж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $\rho = 2670 \text{ кг/м}^3$.

Задача № I-31

Медная трубка с $d_2/d_1 = 30/25 \text{ мм}$ находилась под напряжением. В момент отключения тока средняя температура трубки была 190°C .

За какое время средняя температура трубки снизится до 40°C , если она находится в спокойном воздухе с $t_{\text{ж}} = 10^{\circ}\text{C}$?

Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубки $\alpha = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, теплоотдачей с внутренней поверхности пренебречь. Теплоемкость меди $c = 381 \text{ Дж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$, плотность $\rho = 8800 \text{ кг/м}^3$.

Задача № I-32

Небольшой медный ($c = 381 \text{ Дж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $\rho = 8800 \text{ кг/м}^3$) наконечник после отливки вынимает из формы при температуре 650°C и охлаждают в баке с жидкостью ($\alpha = 790 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{ж}} = 75^{\circ}\text{C}$). Объем наконечника $1,75 \text{ см}^3$, площадь его поверхности $3,5 \text{ см}^2$.

Сколько времени должен оставаться в жидкости наконечник, чтобы его

температура снизилась до 100°C ?

Задача № I-33

Стальная труба с размерами $d_2/d_1 = 10/8 \text{ мм}$, $l = 100 \text{ мм}$ ($\lambda = 30 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $a = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$) прогревается в печи с температурой 1000°C . Начальная температура трубы 20°C , коэффициент теплоотдачи при прогреве $40 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Сколько времени потребуется для прогрева трубы до средней температуры 800°C ?

Следующим этапом термической обработки является охлаждение трубы в трансформаторном масле с температурой 20°C .

За какое время труба охладится до средней температуры 30°C ? Коэффициент теплоотдачи между поверхностью трубы и маслом $110 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Задача № I-34

При закалке деталь сначала прогревается в печи, затем охлаждается в жидкости.

Рассчитать время нагрева ($\tau_{\text{нагр}}$) и охлаждения ($\tau_{\text{охл}}$) резца с размерами $5 \times 40 \times 300 \text{ мм}$ ($\lambda = 30 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $a = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$).

Температура в печи 1000°C , средняя температура нагрева резца 850°C , коэффициент теплоотдачи при нагреве $\alpha_{\text{нагр}} = 80 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$. Охлаждение происходит в воде с температурой 20°C , средняя температура охлажденного резца 40°C , коэффициент теплоотдачи при охлаждении $\alpha_{\text{охл}} = 600 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Примечание: Расчет произвести для термически тонкого тела.

Задача № I-35

Найти время τ , через которое медная труба с $d_2/d_1 = 30/25 \text{ мм}$ нагреется до температуры 110°C при протекании тока $I = 9400 \text{ А}$.

Труба находится в спокойном воздухе с $t_{\text{ж}} = 40^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубки $\alpha = 15 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$. Теплоотдачей с внутренней поверхности пренебречь. Удельное электрическое сопротивление меди $\rho_2 = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, теплоемкость $c = 381 \text{ Дж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$, плотность $\rho = 8800 \text{ кг/м}^3$.

Задача № I-36

Найти температуру медного проводника диаметром 20 мм, который в течение 1,5 секунд нагружается током $I = 32000 \text{ А}$. В начальный момент времени проводник находился в спокойном воздухе при температуре $t_{\text{ж}} = 0^{\circ}\text{C}$. Удельное электрическое сопротивление меди $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$

Ом·м, теплоемкость $C = 381 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$, плотность $\rho = 8800 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника $\alpha = 17 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$.

Задача № I-37

Какова будет температура алюминиевой ($C = 920 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$, $\rho = 2670 \text{ кг/м}^3$) проволоки, если по ней пропускать в течение 1 минуты постоянный ток силой 1 А?

Диаметр проволоки 1 мм, длина 10 см, электрическое сопротивление 0,2 Ом. Проволока до включения в сеть и после находится в воздухе с температурой 25°C . Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 20 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$.

Задача № I-38

Электродетонатор имеет форму цилиндра диаметром 0,1 мм, длиной 5 мм. Он находится в воздухе ($t_{\text{ж}} = 30^\circ\text{C}$, $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$). Теплофизические свойства детонатора: $\lambda = 20 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$, $a = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, электрическое сопротивление $R = 0,2 \text{ Ом}$, температура плавления материала детонатора 900°C .

Определить время, по истечении которого детонатор взорвется, если по нему пропускать постоянный ток силой 3 А.

ЗАДАЧА № 2

Плита неограниченной протяженности толщиной 2δ охлаждается с двух сторон в среде с температурой $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$. Начальная температура плиты $t_{\text{н}} = 900^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи (α) на поверхностях плиты постоянный.

Рассчитать температурное поле плиты через время τ после начала охлаждения для безразмерных координат $X = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1$ двумя способами:

- используя уравнение температурного поля (2);
- численным методом.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2.

№ вар.	Материал плиты	2δ , мм	α , Вт/м ² ·°C	τ , мин.
1	БРОНЗА	400	160	20
2	$\lambda = 64 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$	300	119,5	30
3	$C = 381 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	400	160	40
4	$\rho = 8000 \text{ кг/м}^3$	600	149,3	25

№ вар.	Материал плиты	2δ , мм	α , Вт/м ² ·°C	τ , мин.
5	БРОНЗА	800	128	55
6	λ, C, ρ см.вар. I-4	900	142,2	60
7	СТАЛЬ	400	158,9	30
8	$\lambda = 45,4 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$	600	181,6	55
9	$C = 462 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	500	99,9	45
10	$\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$	300	181,6	35
11		600	136,2	40
12	МЕДЬ	400	307,2	20
13	$\lambda = 384 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$	600	128	40
14	$C = 381 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	500	122,9	50
15	$\rho = 8800 \text{ кг/м}^3$	400	115,2	45
16		500	184,3	35
17	АЛЮМИНИЙ	400	163,2	20
18	$\lambda = 202 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$	600	136	25
19	$C = 920 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	300	108,8	35
20	$\rho = 2670 \text{ кг/м}^3$	200	163,2	30
21		300	136	45
22		200	285,6	20
23	ЛАТУНЬ	400	128,2	25
24	$\lambda = 85,5 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$	500	119,7	30
25	$C = 378 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	600	156,7	35
26	$\rho = 8600 \text{ кг/м}^3$	300	136,8	45
27	ЧУГУН	400	141,7	50
28	$\lambda = 63 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$	200	126	40
29	$C = 504 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	500	113,4	35
30	$\rho = 7220 \text{ кг/м}^3$	600	147	30

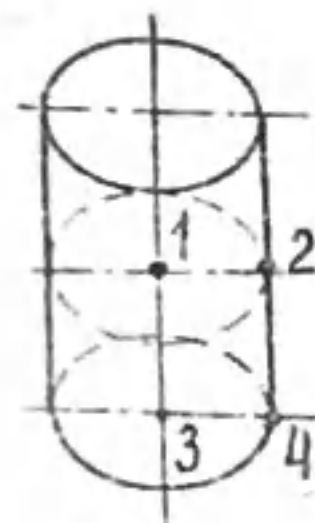


Рис. 6

ЗАДАЧА № 3

Цилиндр диаметром d , высотой h с начальной температурой 20°C помещен в печь с температурой среды 600°C . Коэффициент теплоотдачи в процессе нагрева цилиндра $\alpha = 150 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$. Рассчитать температуры t_1, t_2, t_3, t_4 , а также

воспринятую цилиндром теплоту (Q , Дж) за время τ после начала прогрева.

Дополнительные исходные данные для расчета взять из таблицы 3.
Таблица 3.

№ вар.	Материал цилиндра	d , мм	h , мм	τ , мин.
1	СТАЛЬ	212	363	36
2	$\lambda = 45,4$ Вт/м $^{\circ}$ С	182	333	24
3	$\rho = 7900$ кг/м 3	169	303	18
4	$c = 462$ Дж/кг $^{\circ}$ С	242	424	24
5		272	484	30
6		157	272	36
7	МЕДЬ	307	410	32
8	$\lambda = 384$ Вт/м $^{\circ}$ С	205	307	40
9	$\rho = 8800$ кг/м 3	410	205	15
10	$c = 381$ Дж/кг $^{\circ}$ С	512	614	28
11		614	512	25
12	БРОНЗА	384	512	28
13	$\lambda = 64$ Вт/м $^{\circ}$ С	341	469	25
14	$\rho = 8000$ кг/м 3	427	427	30
15	$c = 381$ Дж/кг $^{\circ}$ С	299	597	35
16		469	683	40
17	ЧУГУН	294	378	35
18	$\lambda = 63$ Вт/м $^{\circ}$ С	252	336	40
19	$\rho = 7220$ кг/м 3	235	294	57
20	$c = 504$ Дж/кг $^{\circ}$ С	336	420	54
21		378	462	52
22		420	504	30
23	АЛЮМИНИЙ	381	490	18
24	$\lambda = 204$ Вт/м $^{\circ}$ С	435	435	10
25	$\rho = 2670$ кг/м 3	326	381	15
26	$c = 920$ Дж/кг $^{\circ}$ С	490	544	20
27	ЛАТУНЬ	228	296	25
28	$\lambda = 85,5$ Вт/м $^{\circ}$ С	251	319	40
29	$\rho = 8600$ кг/м 3	274	342	50
30	$c = 378$ Дж/кг $^{\circ}$ С	319	399	55

Задача № 4-1

Плита из бронзы ($\lambda = 64$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\rho = 8000$ кг/м 3 , $c = 381$ Дж/кг $^{\circ}$ С) неограниченной протяженности толщиной 400 мм, имеющая начальную температуру 900 $^{\circ}$ С, охлаждается в среде с $t_{\text{ж}} = 500 - 0,5\tau$, $^{\circ}$ С. Коэффициент теплоотдачи на поверхности плиты в процессе охлаждения $\alpha = 600 - 0,3\tau$ Вт/м 2 $^{\circ}$ С, τ - время в сек.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры в точках с координатами $X = 0, 0,1, 0,2$, и т.д. до $X = 1$ при $\tau = 10$ мин после начала охлаждения.

Задача № 4-2

Плита из бронзы ($\lambda = 64$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\rho = 8000$ кг/м 3 , $c = 381$ Дж/кг $^{\circ}$ С) неограниченной протяженности толщиной $\delta = 400$ мм, имеет начальную температуру 20 $^{\circ}$ С.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры в точках с координатами $X = 0, 0,1, 0,2$ и т.д. до $X = 1$ через 10 мин после идеального контакта поверхностей плиты с источниками постоянной температуры $t_1 = t_{\text{ж}} = 900^{\circ}$ С.

Задача № 4-3

Решить задачу № 4-2 при условии, что поверхности плиты контактирует с источниками переменной температуры $t_1 = t_{\text{ж}} = 50 + 1,5\tau$, $^{\circ}$ С.

Задача № 4-4

Плита из гидрита лития ($\lambda = 5,5$ Вт/м $^{\circ}$ С, $c = 5680$ Дж/кг $^{\circ}$ С, $\rho = 702$ кг/м 3) неограниченной протяженности толщиной 100 мм имеет начальную температуру 20 $^{\circ}$ С.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры в точках с координатами $X = 0, 0,1, 0,2$ и т.д. до $X = 1$ через $\tau = 20$ мин после идеального контакта верхней поверхности плиты с источником постоянной температуры $t_1 = 900^{\circ}$ С. Теплоотдачей от нижней поверхности плиты пренебречь.

Задача № 4-5

Решить задачу № 4-4 при условии, что верхняя поверхность плиты контактирует с источником переменной температуры $t_1 = 100 + 0,7\tau$, $^{\circ}$ С, τ - время в сек.

Задача № 4-6

Плита неограниченной протяженности с теплофизическими свойствами: $\lambda = 0,1$ Вт/м $^{\circ}$ С, $c = 1400$ Дж/кг $^{\circ}$ С, $\rho = 1000$ кг/м 3 толщиной 50 мм имеет начальную температуру 10 $^{\circ}$ С.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры в точках с координатами $X = 0, 0,1, 0,2$ и т.д. до $X = 1$ через время $T = 15$ мин после идеального контакта верхней поверхности плиты с источником постоянной температуры $t_1 = 800^{\circ}$ С. Со стороны нижней поверхности плиты $t_{н} = 40^{\circ}$ С, $\alpha = 290$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С.

Задача № 4-7

Решить задачу № 4-6 при условии идеального контакта верхней поверхности плиты с источником переменной температуры $t_1 = 20 + 0,9T$, $^{\circ}$ С, T - время в сек.

Задача № 4-8

Решить задачу № 4-6 при условии идеального контакта верхней поверхности плиты с источником переменной температуры $t_1 = 20 + 0,9T$, $^{\circ}$ С и переменного коэффициента теплоотдачи $\alpha = 10 + 0,5T$, Вт/м 2 · $^{\circ}$ С со стороны нижней поверхности плиты, T - время в сек.

Задача № 4-9

Плита неограниченной протяженности с теплофизическими свойствами: $a = 1,85 \cdot 10^{-11}$ м 2 /с, $\lambda = 0,116$ Вт/м $^{\circ}$ С толщиной 200 мм имеет начальную температуру 20 $^{\circ}$ С.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры через время $T = 15$ мин после начала прогрева верхней и нижней поверхностей плиты при следующих условиях: со стороны верхней поверхности $t_{н1} = 1000^{\circ}$ С, $\alpha_1 = 290$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С, со стороны нижней поверхности $t_{н2} = 300^{\circ}$ С, $\alpha_2 = 2500$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С.

Задача № 4-10

Решить задачу № 4-9 при условии переменных коэффициентов теплоотдачи: $\alpha_1 = 50 + 0,5T$, Вт/м 2 · $^{\circ}$ С, $\alpha_2 = 100 + 1,2T$, Вт/м 2 · $^{\circ}$ С, T - время в сек.

Задача № 4-11

Решить задачу № 4-9 при условии идеального контакта верхней поверхности плиты с источником постоянной температуры $t_1 = 800^{\circ}$ С, а

нижней поверхности с источником переменной температуры $t_{н} = 50 + 0,5T$, $^{\circ}$ С, T - время в сек.

Задача № 4-12

Решить задачу № 4-9 при условии идеального контакта верхней поверхности плиты с источником постоянной температуры $t_1 = 500^{\circ}$ С, нижней поверхности плиты с источником постоянной температуры $t_{н} = 200^{\circ}$ С.

Задача № 4-13

Решить задачу № 4-9 при следующих условиях теплообмена на поверхностях: со стороны верхней поверхности $t_{н1} = 1000^{\circ}$ С, $\alpha_1 = 290$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С, со стороны нижней поверхности $t_{н2} = 30 + 0,5T$, $^{\circ}$ С, $\alpha_2 = 100 + 1,5T$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С, T - время в сек.

Задача № 4-14

Двухслойная плоская стенка неограниченной протяженности с верхним слоем толщиной $\delta_1 = 100$ мм ($\lambda_1 = 11,63$ Вт/м $^{\circ}$ С, $c_1 = 565$ Дж/кг $^{\circ}$ С, $\rho_1 = 4460$ кг/м 3) и нижним слоем толщиной $\delta_2 = 200$ мм ($\lambda_2 = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С, $c_2 = 460$ Дж/кг $^{\circ}$ С, $\rho_2 = 7900$ кг/м 3) имеет начальную температуру 17 $^{\circ}$ С.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры на верхней (t_1) и нижней поверхностях (t_2), а также на поверхности контакта слоев ($t_{н}$) через 10 мин после начала прогрева поверхностей при следующих условиях: со стороны верхней поверхности $t_{н1} = 1000^{\circ}$ С, $\alpha_1 = 100$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С, со стороны нижней поверхности $t_{н2} = 500^{\circ}$ С, $\alpha_2 = 50$ Вт/м 2 · $^{\circ}$ С.

Задача № 4-15

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником постоянной температуры $t_1 = 800^{\circ}$ С.

Задача № 4-16

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником постоянной температуры $t_1 = 800^{\circ}$ С. Теплоотдачей от нижней поверхности пренебречь.

Задача № 4-17

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником переменной температуры $t_1 = 50 + 1,1T$, $^{\circ}$ С, T - время в сек.

Задача № 4-18

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником переменной температуры $t_1 = 50 + 1,1 \tau, ^\circ\text{C}$, τ - время в сек. Теплоотдачей от нижней поверхности пренебречь.

Задача № 4-19

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником постоянной температуры $t_1 = 800^\circ\text{C}$ и переменным коэффициентом теплоотдачи со стороны нижней поверхности $\alpha_2 = 20 + 0,8 \tau, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, τ - время в сек.

Задача № 4-20

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником переменной температуры $t_1 = 50 + 1,1 \tau, ^\circ\text{C}$ и переменным коэффициентом теплоотдачи со стороны нижней поверхности $\alpha_2 = 20 + 0,8 \tau, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, τ - время в сек.

Задача № 4-21

Решить задачу № 4-14 при условии переменных коэффициентов теплоотдачи со стороны верхней поверхности $\alpha_1 = 30 + 0,5 \tau, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ и со стороны нижней поверхности $\alpha_2 = 20 + 0,8 \tau, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Задача № 4-22

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником постоянной температуры $t_1 = 800^\circ\text{C}$, нижней поверхности с источником постоянной температуры $t_{21} = 500^\circ\text{C}$.

Задача № 4-23

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником постоянной температуры $t_1 = 1000^\circ\text{C}$, нижней поверхности с источником переменной температуры $t_{21} = 50 + 0,5 \tau, ^\circ\text{C}$.

Задача № 4-24

Решить задачу № 4-14 при следующих условиях теплообмена поверхностей: на верхней поверхности $t_{11} = 100 + 0,9 \tau, ^\circ\text{C}$, $\alpha_1 = 50 + 0,5 \tau, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, τ - время в сек, теплоотдачей на нижней поверхности пренебречь.

Задача № 4-25

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником постоянной температуры $t_1 = 700^\circ\text{C}$, со стороны нижней поверхности $t_{21} = 50 + 0,5 \tau, ^\circ\text{C}$, $\alpha_2 = 20 + 0,8 \tau, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Л и т е р а т у р а

1. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. - М.: Энергоиздат, 1981.
2. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. - М.: Энергия, 1980.
3. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена. /В.Н.Афанасьев и др. - М.: Высш.шк., 1986.
4. Ф.Крейт, У.Блэк. Основы теплопередачи. - М.: Мир, 1983.
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1990.

Методические указания и задачи для самостоятельной работы студентов

Составитель Коновалова Лидия Степановна

Подписано к печати 04.02.94.
 Формат 60x84/16. Бумага писчая № 2.
 Плоская печать. Усл.п.л. 1,68. Уч.-изд.л. 1,53.
 Тираж 150 экз. Заказ 90. Бесплатно.
 Ротапринт ТПУ. 634004, Томск, пр. Ленина, 30.

Методические указания и задачи для самостоятельной работы по курсу "Тепломассообмен" для студентов теплотехнических специальностей. - Томск: изд-во ТПУ, 1994. - 47 с.

Составитель Коновалова Л.С.

Рецензент доц. к.т.н. Фурман А.В.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры теоретической и общей теплотехники 24 июня 1994 года.

Зав. кафедрой



Ю.А. Загромов

Условные обозначения: $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ - число Нуссельта, $Gr = \frac{g \beta l^3}{\nu^2}$ - число Грасгофа, $Re = \frac{w l}{\nu}$ - число Рейнольдса, $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ - число Прандтля, l - определяющий размер, $\alpha, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{С}$ - коэффициент теплоотдачи, $\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{С}$ - коэффициент теплопроводности, $g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{С}^2}$ - ускорение силы тяжести, $\beta, \frac{1}{\text{К}}$ - температурный коэффициент объемного расширения, $\nu, \text{м}^2/\text{С}$ - коэффициент кинематической вязкости, $w, \text{м/С}$ - скорость, $\alpha, \text{м}^2/\text{С}$ - коэффициент температуропроводности, $\tau_c = |t_c - t_m|$ - перегрев.

Значения $\beta(t)$, $\lambda(t)$, $\nu(t)$ для жидкостей и газов, $\beta(t)$ для жидкостей содержатся в справочных таблицах. Для газов температурный коэффициент объемного расширения рассчитывается по формуле:

$$\beta = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{K}$$

Индексы при числах подобия, например, Nu_m , Gr_m , Pr_m , Pr_c указывают на определяющий размер ($l=d$, $l=\delta$) и на определяющую температуру (t_m , t_c), при которой следует брать из таблиц необходимые для расчета величины: λ , ν , Pr и т.д.

Большинство уравнений подобия, по которым рассчитываются коэффициенты теплоотдачи, содержат коэффициент

$$\epsilon_t = \left(\frac{Pr_m}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

учитывающий изменение свойств жидкости или газа с изменением температуры.

Для газов с достаточной точностью можно принимать $\epsilon_t = 1$, для жидкостей ϵ_t отличается от 1 и тем существеннее, чем больше $|t_c - t_m|$.

1. Теплоотдача при естественной конвекции

а) в большом объеме.

Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются по уравнению

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)_m^n \cdot \epsilon_t \quad (1)$$

Постоянные C и n определяются из таблицы 1.

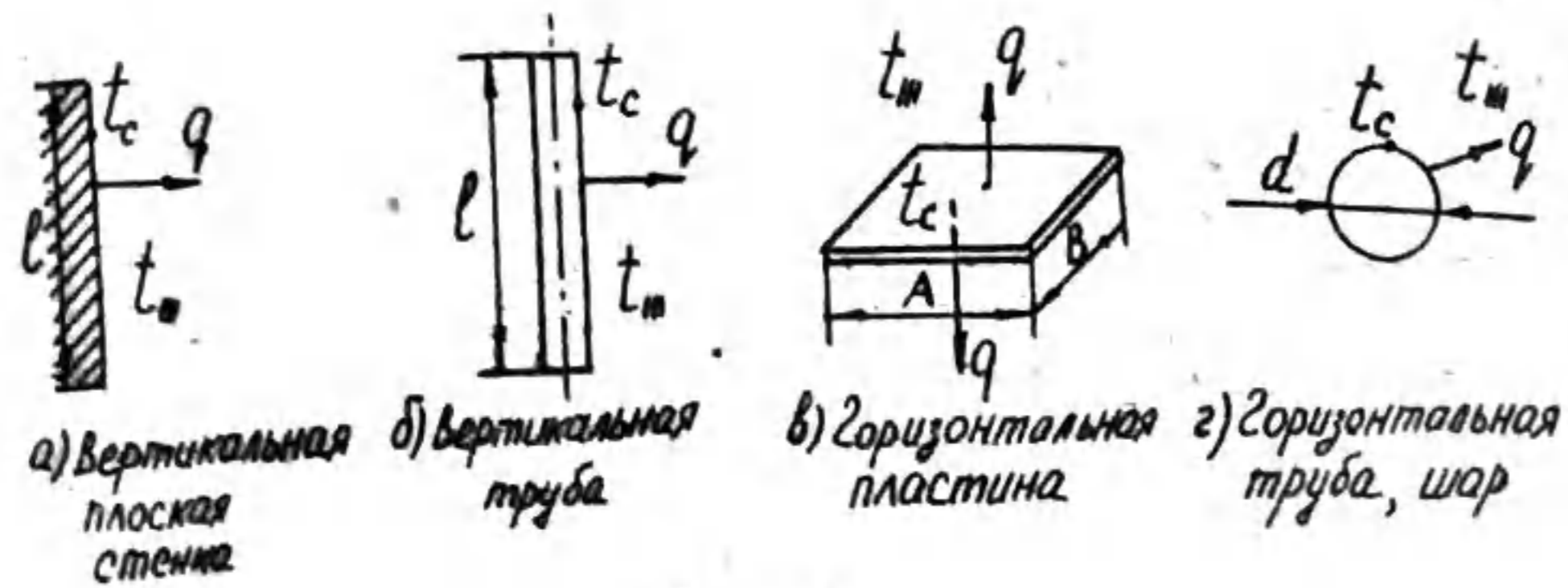


Рис. 1

Таблица I.

Поверхность теплообмена	$(Gr \cdot Pr)_m$	C	n	Определяющий размер
Вертикальная пластина, вертикальная труба	$10^3 + 10^9$	0,76	1/4	высота l
	$> 10^9$	0,15	1/3	
Горизонтальная труба, шар	$< 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8	диаметр d
	$5 \cdot 10^2 + 10^8$	0,5	1/4	

Для горизонтальной пластины расчет α производится как для вертикальной, определяющий размер - меньшая сторона пластины. Если тепло от нагретой поверхности пластины отводится вверх, то коэффициент теплоотдачи увеличивает на 30%, если вниз - уменьшают на 30%.

б) в замкнутом объеме.

Теплота, передаваемая конвекцией и теплопроводностью через плоские прослойки

$$Q = \frac{\lambda \epsilon_k}{\delta} (t_1 - t_2) F, \text{ Вт}, \quad (2)$$

ϵ_k - коэффициент, учитывающий конвективную составляющую передаваемой теплоты.



Рис. 2

Через цилиндрические прослойки

$$Q = \frac{2\pi l \lambda \epsilon_k (t_1 - t_2)}{\ln \frac{D}{d}}, \text{ Вт}. \quad (3)$$

Для прослоек любой формы

$$\epsilon_k = 0,18 (Gr \cdot Pr)_m^{0,25}, \quad (4)$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad Gr = \frac{g \beta (t_1 - t_2) \delta^3}{\nu^2}$$

При $(Gr \cdot Pr)_m \leq 10^3$ $\epsilon_k = 1$.

При $(Gr \cdot Pr)_m > 10^3$ ϵ_k рассчитывается по (4).

2. Теплоотдача при омовании поверхности продольным потоком жидкости

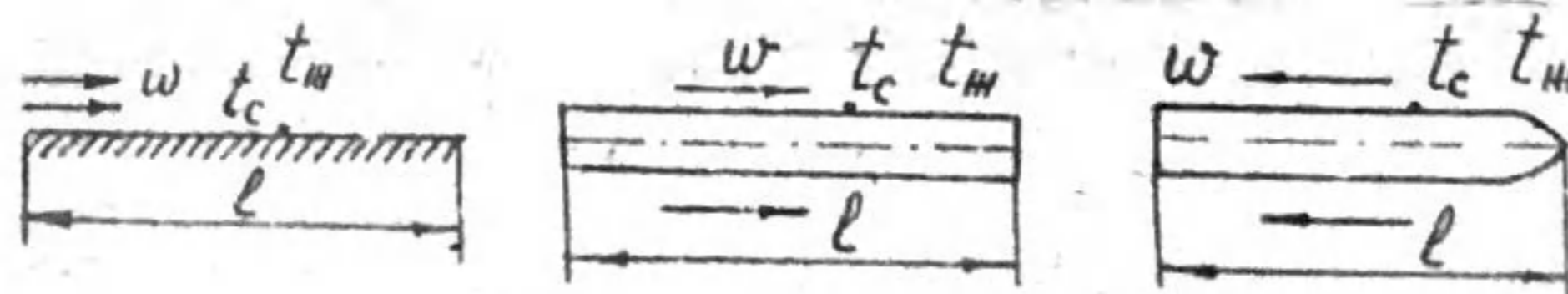


Рис. 3

Средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формулам:
 При ламинарном течении в пограничном слое ($Re_{me} \leq 5 \cdot 10^5$)

$$Nu_{me} = 0,66 Re_{me}^{0,5} Pr_m^{0,33} \cdot \epsilon_t \quad (5)$$

При турбулентном течении ($Re_{me} > 5 \cdot 10^5$)

$$Nu_{me} = 0,037 Re_{me}^{0,8} Pr_m^{0,43} \cdot \epsilon_t \quad (6)$$

3. Теплоотдача при обтекании одиночной трубы поперечным потоком жидкости

Средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формулам:

при $40 < Re_{md} < 10^3$

$$Nu_{md} = 0,5 Re_{md}^{0,5} Pr_m^{0,38} \cdot \epsilon_t \cdot \epsilon_\psi \quad (7)$$

при $10^3 < Re_{md} < 2 \cdot 10^5$

$$Nu_{md} = 0,25 Re_{md}^{0,6} Pr_m^{0,38} \cdot \epsilon_t \cdot \epsilon_\psi \quad (8)$$

при $2 \cdot 10^5 < Re_{md} < 10^7$

$$Nu_{md} = 0,023 Re_{md}^{0,8} Pr_m^{0,37} \cdot \epsilon_t \cdot \epsilon_\psi \quad (9)$$

где ϵ_ψ - коэффициент, учитывающий угол атаки набегающего потока.
 При $\psi = 90^\circ$ $\epsilon_\psi = 1$, при $\psi < 90^\circ$ $\epsilon_\psi = 1 - 0,54 \cos^2 \psi$

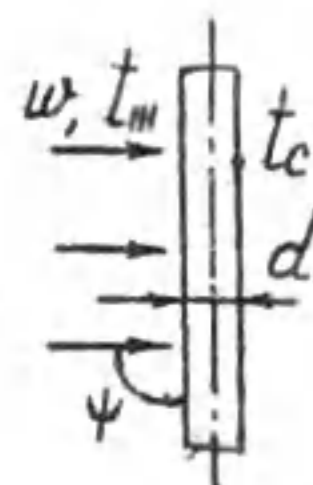
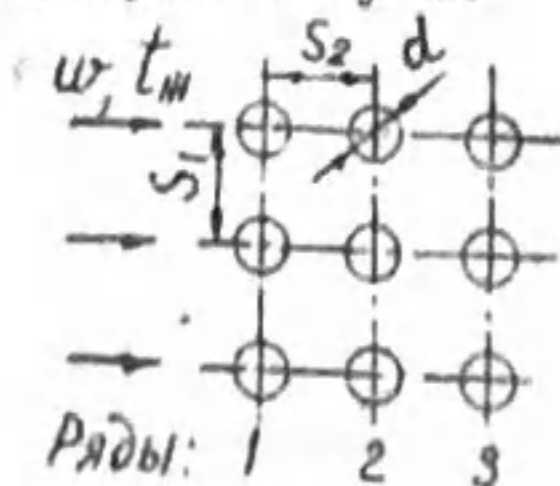


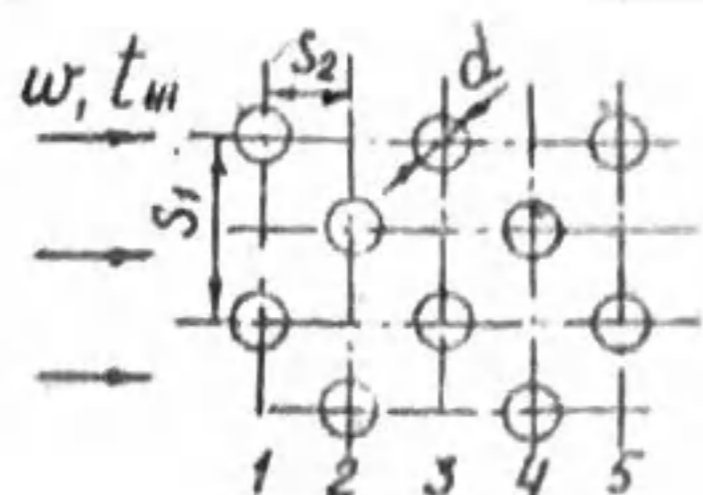
Рис. 4

4. Теплоотдача при обтекании пучков труб поперечным потоком жидкости

а) необребренные пучки



а) Коридорный пучок



б) Шахматный пучок

Коэффициент теплоотдачи для 3 и последующих рядов коридорного и шахматного пучков рассчитывается по уравнениям, приведенным в табл. 2.

Таблица 2.

Re_{md}	Шахматные пучки	Коридорные пучки
$40 \div 10^3$	$Nu_{md} = 0,71 Re_{md}^{0,5} Pr_m^{0,36} \cdot \epsilon_t$	$Nu_{md} = 0,52 Re_{md}^{0,5} Pr_m^{0,36} \cdot \epsilon_t$
$10^3 \div 10^5$	$Nu_{md} = 0,41 Re_{md}^{0,6} Pr_m^{0,33} \cdot \epsilon_t \cdot \epsilon_s$ при $\frac{s_1}{s_2} < 2$ $\epsilon_s = \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^{1/6}$ при $\frac{s_1}{s_2} \geq 2$ $\epsilon_s = 1,12$	$Nu_{md} = 0,26 Re_{md}^{0,65} Pr_m^{0,33} \cdot \epsilon_t \cdot \epsilon_s$ $\epsilon_s = \left(\frac{s_2}{d}\right)^{-0,15}$
$> 10^5$	$Nu_{md} = 0,021 Re_{md}^{0,84} Pr_m^{0,36} \cdot \epsilon_t$	
Коэф. теплоотдачи 1 и 2 рядов	$d_1 = 0,6 d_3$ $d_2 = 0,7 d_3$	$d_1 = 0,6 d_3$ $d_2 = 0,9 d_3$

Конвективный теплообмен между трубами пучка и потоком жидкости рассчитывается по формуле

$$Q = \alpha_{пучка} \cdot F (t_m - t_c), \text{ Вт}$$

где $\alpha_{пучка} = \frac{d_1 + d_2 + d_3(n-2)}{n}$ - средний коэффициент теплоотдачи пучка, имеющего n рядов одинаковых труб с равным числом труб в каждом ряду.

б) Обребренные пучки.

Коэффициент теплоотдачи для 3 и последующих рядов коридорного и шахматного пучков рассчитывается по уравнению

$$Nu_{md} = c Re_{md}^n \left(\frac{d}{l}\right)^{-0,54} \left(\frac{l}{d}\right)^{-0,14} \quad (10)$$

l - шаг ребер, определяющий размер, l - длина ребра, d - наружный диаметр трубы, c, n - постоянные (табл. 3).

Re_{md}	$2,5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	10^4
$\epsilon_{пер}$	0,4	0,57	0,72	0,81	0,88	0,96	1,0

Таблица 3.

Тип луча	Форма ребер	C	n
Коридорный	Круглые	0,104	0,72
	Призматические	0,096	
Самодельный	Круглые	0,223	0,65
	Прямоугольные	0,205	

5. Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах

При течении жидкости в трубах средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формулам:

при ламинарном режиме ($Re_{md} < 2300$)

$$Nu_{md} = 0,15 Re_{md}^{0,33} Pr_m^{0,43} Gr_{md}^{0,4} \epsilon_t \cdot \epsilon_l \quad (II)$$

где ϵ_l - коэффициент, учитывающий увеличение теплоотдачи в коротких трубах, при $l/d \geq 50$ $\epsilon_l = 1$, при $l/d < 50$ ϵ_l вычисляется из таблицы 4.

Таблица 4.

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40
ϵ_l	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02

При турбулентном режиме ($Re_{md} \geq 10^4$)

$$Nu_{md} = 0,021 Re_{md}^{0,8} Pr_m^{0,43} \epsilon_t \cdot \epsilon_l \quad (I2)$$

при $l/d \geq 50$ $\epsilon_l = 1$, при $l/d < 50$ $\epsilon_l = 1 + \frac{2d}{l}$.

При переходном режиме ($2300 < Re_{md} < 10^4$)

$$Nu_{md} = 0,021 Re_{md}^{0,8} Pr_m^{0,43} \epsilon_t \cdot \epsilon_l \cdot \epsilon_{пер} \quad (I3)$$

где $\epsilon_{пер} = f(Re_{md})$ и определяется из табл. 5.

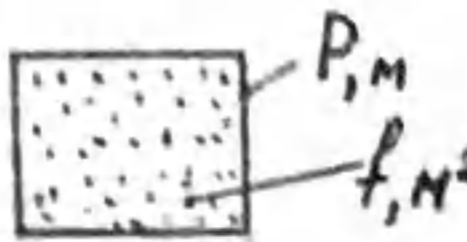


Рис. 6

Для каналов некруглого сечения (рис. 6) приближенный расчет коэффициентов теплоотдачи производится по формулам (II) - (I3), определяющим размером является эквивалентный диаметр

$$d_{экв} = \frac{4f}{P}$$

где f , м² - поперечное сечение канала, P , м - периметр.

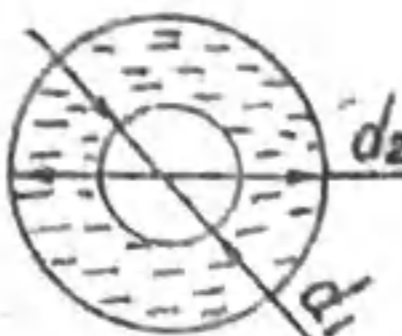


Рис. 7

Для каналов кольцевого сечения (рис. 7) средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$Nu_{md_2} = 0,017 Re_{md_2}^{0,8} Pr_m^{0,4} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0,18} \epsilon_t \quad (I4)$$

$d_2 = d_2 - d_1$ - определяющий размер.

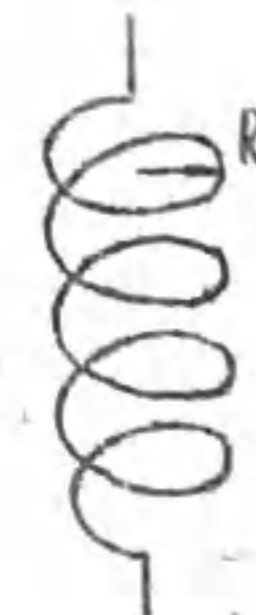


Рис. 8

Для змеевиковых труб (рис. 8) коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$Nu_{md} = 0,04 Re_{md}^{0,8} Pr_m^{0,4} \left(\frac{d}{R}\right)^{0,21} \epsilon_t \quad (I5)$$

R - радиусгиба трубы.

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ РАБОТЕ ПРИБРАТЕННИК

Условные обозначения: $Z_s = \left(\frac{g h^3}{\nu^2}\right)^{1/3} \frac{\lambda_m \Delta t}{2 \rho_m \nu_m}$ - безразмерный индекс, $Re_s = \frac{d \Delta t \ell}{2 \rho_m \nu_m}$ - число Рейнольдса, Pr_{ms} , Pr_{mc} - числа Прандтля, $Fz = \frac{W n^2}{g d}$ - число Фруда, $K = \frac{z}{c_p \Delta t}$ - число Уиттледжа, $\alpha = 0,9 \left[1 + \left(\frac{Pr_{ms} K}{R}\right)^{1/3}\right]$, $R = \left(\frac{\rho_m \mu_m}{\rho_n \mu_n}\right)^{1/2} \frac{c_p \Delta t}{\lambda_m}$ - безразмерные величины, ρ , kg/m^3 - плотность, λ , $W/m \cdot K$ - теплопроводность, μ [Pa·c] - коэффициент динамической вязкости, c_p , $\frac{J}{kg \cdot K}$ - изобарная теплоемкость конденсата, t_s - температура насыщения, $\Delta t = t_s - t_c$.

Индексы \bar{n} , \bar{m} ($\rho_n, \mu_n, \rho_m, \mu_m, Pr_{ms}$) указывают фазу (пар или конденсат). Индексы \bar{s} , \bar{c} указывают на определяющую температуру. Индексы \bar{d} , \bar{x} , $\bar{\ell}$ указывают на определяющий размер.

6. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного пара

Коэффициент теплоотдачи при конденсации пара на вертикальной поверхности высотой h и ламинарном течении пленки конденсата ($Z_s = \left(\frac{g h^3}{\nu^2}\right)^{1/3} \frac{\lambda_m \Delta t}{2 \rho_m \nu_m} < 2300$) рассчитывается по уравнению

$$Re_s = 0,95 Z_s^{0,78} \cdot \epsilon_t \quad (16)$$

где $\epsilon_t = \left(\frac{Pr_{ms}}{Pr_{mc}}\right)^{0,25}$

при смешанном течении пленки конденсата ($Z_s > 2300$)

$$Re_s = [89 + 0,024 \cdot \epsilon_t \cdot Pr_{ms}^{0,5} \cdot (Z_s - 2300)]^{4/3} \quad (17)$$

При конденсации пара на наклонных поверхностях коэффициент теплоотдачи уменьшается по сравнению с конденсацией на вертикальных

ных поверхностях

$$\alpha_{накл} = \alpha_{верт} \sqrt{\cos \psi}$$

ψ - угол наклона поверхности к вертикали.

При конденсации неподвижного пара на горизонтальной трубе коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле Нуссельта

$$\alpha_N = 0,728 \sqrt{\frac{\lambda_m^3 \rho_m^2 g z}{\mu_m d (t_s - t_c)}} \cdot \epsilon_t \quad (18)$$

7. Теплоотдача при пленочной конденсации движущегося пара

Коэффициент теплоотдачи при конденсации движущегося пара на горизонтальной трубе и движении пара сверху вниз рассчитывается по формуле

$$\frac{\alpha}{\alpha_N} = \left(1 + 3,62 \alpha^4 \frac{Fz}{Pr_{ms} K}\right)^{1/4} \quad (19)$$

$$Fz = \frac{W n^2}{g d}, K = \frac{z}{c_p \Delta t}, \alpha = 0,9 \left[1 + \left(\frac{Pr_{ms} K}{R}\right)^{1/3}\right], R = \left(\frac{\rho_m \mu_m}{\rho_n \mu_n}\right)^{1/2}$$

При конденсации движущегося пара на пучках труб средний коэффициент теплоотдачи к поверхности труб пучка рассчитывается по формуле:

$$\frac{\alpha_{пучка}}{\alpha_N} = \frac{\alpha}{\alpha_N} \cdot \frac{0,84 \epsilon}{[1 - (1 - \epsilon)^{0,78}] \cdot n^{0,625}} \quad (20)$$

где $\frac{\alpha}{\alpha_N}$ рассчитывается по (19), α_N - по (18), n - число труб по высоте коридорного пучка или половине числа труб по высоте шахматного пучка, $\epsilon = \frac{G_{вх} - G_{вых}}{G_{вх}}$ - степень конденсации пара, $G_{вх}$, $G_{вых}$ - массовые расходы пара на входе и выходе пучка.

8. Теплоотдача при пленочной конденсации пара, движущегося
внутри трубы

Скорость пара на входе в трубу

$$w_n = 4G_n / \pi d^2 \rho_n,$$

скорость конденсата на выходе из трубы (скорость циркуляции)

$$w_u = 4G_n / \pi d^2 \rho_w.$$

При $w_n \leq 40$ м/с коэффициент теплоотдачи при конденсации сухого насыщенного пара в вертикальных трубах рассчитывается по формулам (16) и (17).

При $w_n > 40$ м/с на коэффициент теплоотдачи влияют скорость пара и режим течения пленки конденсата.

При ламинарном режиме ($Re_{uds} = \frac{w_u d}{\nu_w} < 5 \cdot 10^3$)

$$Nu_{ds} = 0,28 Re_{ds}^{0,6} \left[\kappa Pr_w \frac{\rho_n}{\rho_w} \left(\frac{v_n}{v_w} \right)^2 \right]^{1/3}, \quad (21)$$

$$Nu_{ds} = \frac{\alpha d}{\lambda_w}, \quad Re_{ds} = \frac{w_u d}{\nu_w}, \quad \kappa = \frac{z}{c_{p_m}(t_s - t_c)}$$

При турбулентном течении пленки ($Re_{uds} > 5 \cdot 10^3$)

$$\alpha = \frac{\alpha_u}{2} \left[\sqrt{1 + x_1 \left(\frac{\rho_w}{\rho_n} - 1 \right)} + \sqrt{1 + x_2 \left(\frac{\rho_w}{\rho_n} - 1 \right)} \right] \epsilon, \quad (22)$$

α_u рассчитывается по уравнению

$$Nu_{uds} = 0,021 Re_{uds}^{0,8} Pr_{ws}^{0,43}, \quad (23)$$

x_1, x_2 - степени сухости пара на входе и на выходе из трубы,

ϵ - коэффициент, учитывающий материал трубы: $\epsilon = 1,14$ для стальных труб, $\epsilon = 1,24$ - для латунных, $\epsilon = 1,5$ - для медных труб.

9. Теплоотдача при пузырьковом кипении жидкости

Коэффициент теплоотдачи при кипении жидкости в большом объеме (при $0,005 < \frac{P}{P_{кр}} < 0,8$) рассчитывается по формуле

$$\alpha = 0,075 \left[1 + 10 \left(\frac{P_n}{P_w - P_n} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{\lambda_w}{\nu_w \sigma T_s} \right)^{1/3} q^{2/3}. \quad (24)$$

Для воды эта формула упрощается

$$\alpha = \frac{3,4 (10P)^{0,18}}{1 - 0,045P} q^{2/3} \quad (25)$$

или

$$\alpha = \frac{39,3 (10P)^{0,54}}{1 - 0,045P} \Delta t^2, \quad (26)$$

где P [МПа], q [$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$], α [$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$].

Коэффициент теплоотдачи при вынужденном течении кипящей жидкости в трубах определяется путем сравнения α_q , рассчитанного по формулам (24), (25) или (26) и α_w , рассчитанного по формулам (11), (12) или (13).

При $\alpha_q / \alpha_w \leq 0,5$ $\alpha = \alpha_w$,

при $\alpha_q / \alpha_w > 2$ $\alpha = \alpha_q$,

при $0,5 < \alpha_q / \alpha_w < 2$ $\alpha = \alpha_w \frac{4\alpha_w + \alpha_q}{5\alpha_w - \alpha_q}$.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Рассчитать тепловой поток Q , Вт от горячей воды с $t_{w1} = 86^\circ\text{C}$, движущейся внутри горизонтальной стальной трубой длиной $l = 10$ м, диаметром $d_2/d_1 = 100/90$ мм. Расход воды $G = 10$ кг/с. Труба используется для отопления гаража, температура воздуха в котором $t_{w2} = 20^\circ\text{C}$, температура стен гаража $t_c = 15^\circ\text{C}$.

Решение

Условные обозначения: t_{c_1} , t_{c_2} - температуры на внутренней и наружной поверхностях трубы, $\rho, \text{кг/м}^3$ - плотность воды, Q_K, Q_T, Q_0 - потоки теплоты, передаваемые конвекцией, теплопроводностью и излучением, F_C - площадь стен гаража.

Анализ способов передачи теплоты от воды к внутренней поверхности трубы, через стенку трубы и от наружной поверхности трубы к воздуху и стенам гаража дает

$$Q = Q_{K1} = Q_T = Q_{K2} + Q_{\lambda 2}$$

или

$$Q = \frac{t_{m1} - t_{m2}}{\frac{1}{\alpha_1 \pi d_1 l} + \frac{1}{2\pi l \lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{\text{экв}2} \pi d_2 l}}$$

где

$$\alpha_{\text{экв}2} = \alpha_2 + \frac{Q_{\lambda 2}}{\pi d_2 l (t_{c2} - t_{m2})}$$

$$Q_{\lambda 2} = \epsilon_0 \epsilon_c \pi d_2 l \left[\left(\frac{t_{c2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{m2}}{100} \right)^4 \right], \text{ т.к. } F_2 = \pi d_2 l \ll F_c.$$

Из приложения к [3] и [4]: теплопроводность стали $\lambda_c = 45,4$ Вт/м $^\circ\text{C}$, степень черноты стали окисленной шероховатой $\epsilon_c = 0,95$.

Расчет коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 требует знания температур t_{c_1} и t_{c_2} на поверхностях трубы. Вначале этими температурами задаются, производят расчет α_1, α_2, Q и затем рассчитывают

t_{c_1} и t_{c_2} по формулам

$$Q = \alpha_1 \pi d_1 l (t_{m1} - t_{c1}),$$

$$Q = \alpha_{\text{экв}2} \pi d_2 l (t_{c2} - t_{m2}),$$

$$Q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{2\pi l \lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1}}$$

Если t_{c_1} и t_{c_2} не совпали с ранее заданными, расчет повторяют, используя найденные температуры. Такой способ решения называется

методом последовательных приближений.

Так как коэффициенты теплоотдачи к жидкостям на 2-3 порядка больше, чем коэффициенты теплоотдачи к газам, следовательно $R_1 = \frac{1}{\alpha_1 F_1} \ll R_2 = \frac{1}{\alpha_{\text{экв}2} F_2}$ и термическое сопротивление стенки трубы мало, $R_2 = \frac{1}{2\pi l \lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1} \rightarrow 0$, можно принять $t_{c1} = 85,5^\circ\text{C}$, $t_{c2} = 85^\circ\text{C}$.

РАСЧЕТ α_1 . Средняя скорость течения воды в трубе

$$w = \frac{4G}{\pi d_1^2 \rho} = \frac{4 \cdot 10}{3,14 \cdot 0,09^2 \cdot 1000} = 1,57 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Теплофизические свойства воды при $t_{m1} = 86^\circ\text{C}$:

$$\lambda = 0,6776 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}, \quad \nu = 0,342 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad Pr_m = 2,05.$$

Число Рейнольдса

$$Re_{md} = \frac{w d_1}{\nu} = \frac{1,57 \cdot 0,09}{0,342 \cdot 10^{-6}} = 4,13 \cdot 10^5.$$

Так как $Re_{md} > 10^4$, режим течения турбулентный, согласно формулы (12)

$$Nu_{md} = 0,021 (4,13 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 2,05^{0,43} = 889,3,$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_1} = \frac{889,3 \cdot 0,6776}{0,09} = 6695,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Поправочные коэффициенты $\epsilon_2 = 1$, т.к. $l/d = \frac{10}{0,09} = 111 > 50$, $\epsilon_2 = 1$, т.к. $t_{m1} \approx t_{c1}$.

РАСЧЕТ α_2 . Теплоотдача при естественной конвекции между наружной поверхностью трубы и воздухом описывается уравнением (1).

Теплофизические свойства воздуха при $t_{m2} = 20^\circ\text{C}$, $\lambda = 0,0259$ Вт/м $^\circ\text{C}$, $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м 2 /с, $Pr_m = 0,703$, $\beta = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{293}$, число Прандтля при $t_{c2} = 85^\circ\text{C}$ $Pr_c = 0,691$.

Произведение

$$(Gr \cdot Pr)_{\text{н}} = \frac{g \beta \nu_c d_2^3}{\nu^2} Pr_m = \frac{9,8 (85-20) 0,1^3}{293 (15,06 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0,703 = 6,74 \cdot 10^6.$$

Из табл. 4-I: $C = 0,5$, $n = 0,25$.

$$Nu_{md} = 0,5 (6,74 \cdot 10^6)^{0,25} \left(\frac{0,703}{0,691} \right)^{0,25} = 25,6$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_2} = \frac{25,6 \cdot 0,0259}{0,1} = 6,63 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$$

Теплообмен излучением между поверхностью трубы и стенками гара-

$$Q_{\lambda_2} = 5,67 \cdot 0,95 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 10 \left[\left(\frac{85+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{15+273}{100} \right)^4 \right] = 1614,6 \text{ Вт}$$

Эквивалентный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{экв_2} = 6,63 + \frac{1614,6}{3,14 \cdot 0,1 \cdot 10 (85-20)} = 14,54 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$$

Теплопередача через стенку трубы

$$Q = \frac{86-20}{\frac{1}{6695,2 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 10} + \frac{1}{6,28 \cdot 10 \cdot 45,4} \ln \frac{100}{90} + \frac{1}{14,54 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 10}} = 3001 \text{ Вт}$$

Температуры на поверхностях трубы

$$t_{c_1} = t_{m_1} - \frac{Q}{\alpha_1 \pi d_1 l} = 86 - \frac{3001}{6695,2 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 10} = 85,8 \text{ °C}$$

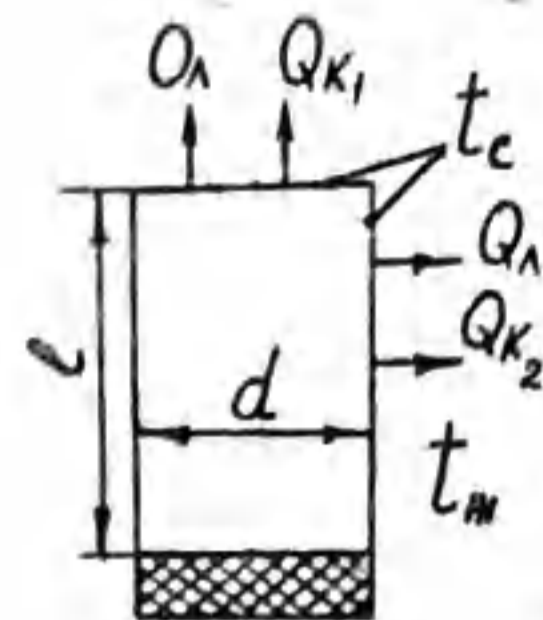
$$t_{c_2} = t_{c_1} - \frac{Q}{2\pi l \lambda_c \ln \frac{d_2}{d_1}} = 85,8 - \frac{3001}{6,28 \cdot 10 \cdot 45,4 \ln \frac{100}{90}} = 85,7 \text{ °C}$$

Расчитанные t_{c_1} и t_{c_2} близки к заданным ранее ($t_{c_1} = 85,5 \text{ °C}$, $t_{c_2} = 85 \text{ °C}$), поэтому полученный результат $Q = 3001 \text{ Вт}$ является окончательным. Повторный расчет проводят в том случае, если ошибка в задании температур t_{c_1} , t_{c_2} превышает 10%.

ЗАДАЧИ

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ

Задача № I-1



Электрокотел, предназначенный для выработки сухого насыщенного пара при атмосферном давлении, представляет собой металлический бак цилиндрической формы с наружными размерами $d = 1 \text{ м}$, $l = 1,5 \text{ м}$. Давление сухого насыщенного пара $p = 760 \text{ мм рт.ст.}$, температура наружной поверхности $t_{c_1} = 100 \text{ °C}$, степень черноты наружной поверхности принята, согласно справочника, для окисленного железа, мощность нагревателя электрокотла $N = 25 \text{ кВт}$, температура окружающего воздуха $t_m = 18 \text{ °C}$.

Расчитать: 1. Теплопотери в окружающую среду (Q , Вт).

2. Количество пара в кг, вырабатываемого за 1 час.

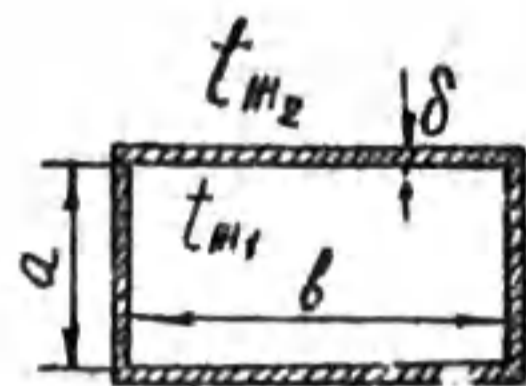
Задача № I-2

Горящая электрическая лампочка мощностью $N = 60 \text{ Вт}$ имеет температуру поверхности $t_c = 210 \text{ °C}$. Температура окружающего воздуха $t_m = 20 \text{ °C}$.

Расчитать конвективную теплоотдачу (Q_k , Вт), лучистую теплоотдачу (Q_λ , Вт) и степень черноты поверхности (ϵ) при условии, что лампочка имеет шарообразную форму с эквивалентным диаметром $d_{экв} = 70 \text{ мм}$.

Задача № I-3

По воздуховоду с размерами $a \times b = 300 \times 500 \text{ мм}$ и толщиной стенки $\delta = 5 \text{ мм}$ передается горячий воздух со средней температурой $t_{m_1} = 300 \text{ °C}$ и скоростью $w_1 = 15 \text{ м/с}$. Снаружи - спокойный воздух с температурой $t_{m_2} = 15 \text{ °C}$. Температура на поверхностях стенки воздуховода $t_{c_1} = t_{c_2} = 210 \text{ °C}$.

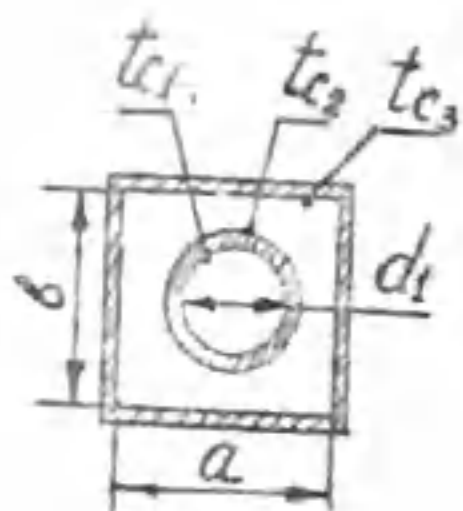


Расчитать:

1. Коэффициент теплоотдачи от горячего воздуха к внутренней поверхности воздуховода (α_1) и тепловой поток (Q , Вт/м).
2. Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности к спокойному воздуху (α_2) и конвективную составляющую теплового потока ($Q_k \cdot \frac{Q_{in}}{M}$).

3. Сравните Q и Q_k , объясните почему они отличаются. Рассчитайте степень черноты наружной поверхности воздуховода.

Задача № I-4



Горячий воздуховод находится внутри прямоугольного кожуха. Между трубой и кожухом - спокойный воздух.

Дано: $d_1 = 140$ мм, $d_2 = 150$ мм, $a = b = 160$ мм, горячий воздух передается со скоростью $w_1 = 10$ м/с при средней температуре $t_{m1} = 350^\circ\text{C}$, $t_{c1} \approx t_{c2} = 210^\circ\text{C}$, $t_{c3} = 50^\circ\text{C}$.

Рассчитать:

1. Коэффициент теплоотдачи от горячего воздуха к внутренней поверхности трубы (α) и тепловой поток (Q , Вт/м).
 2. Конвективную составляющую передаваемой теплоты через воздушную прослойку между трубой и кожухом (Q_k , Вт/м).
- Сравните Q и Q_k и объясните, почему они не совпадают.

Задача № I-5

Горизонтальный провод (медь окисленная) под напряжением имеет температуру на поверхности $t_c = 100^\circ\text{C}$, диаметр провода $d = 2$ мм, температура воздуха в ветряную погоду $t_m = 0^\circ\text{C}$, скорость ветра $w = 10$ м/с, угол атаки $\psi = 60^\circ$.

Рассчитать конвективную теплоотдачу (Q_k , Вт/м).

Какова электрическая мощность провода (N , Вт/м)?

Как изменится температура на поверхности провода (t_c'), если его покрыть электроизоляцией толщиной $\delta_{из} = 1$ мм, $\lambda_{из} = 0,5$ Вт/м \cdot °C, $\epsilon_{из} = 0,817$?

Задача № I-6

Горизонтальный провод (алюминий полированный) под напряжением имеет температуру на поверхности $t_c = 80^\circ\text{C}$, диаметр провода $d = 3$ мм, температура окружающего спокойного воздуха $t_m = 5^\circ\text{C}$. Рассчитать конвективную теплоотдачу (Q_k , Вт/м). Какова электрическая мощность провода (N , Вт/м)?

Как изменится температура на поверхности провода (t_c'), если его покрыть электроизоляцией толщиной $\delta_{из} = 1$ мм, $\lambda_{из} = 0,5$ Вт/м \cdot °C, $\epsilon_{из} = 0,734$?

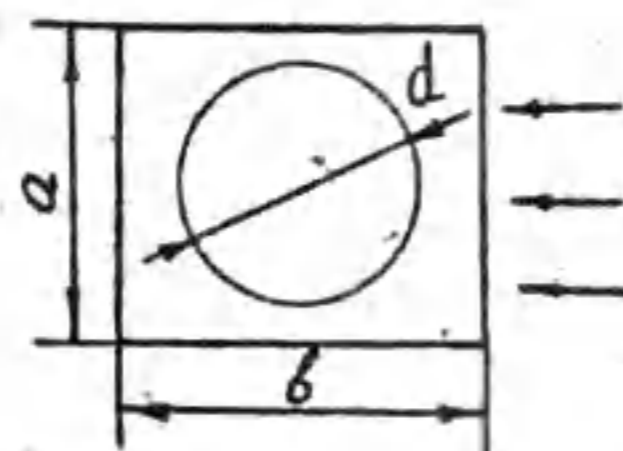
Задача № I-7

Дымовая труба из красного кирпича имеет размеры $d_1 = 1,5$ м, $d_2 = 2$ м, $h = 120$ м. Средняя температура дымовых газов $t_{m1} = 300^\circ\text{C}$, скорость $w = 0,5$ м/с. Температура на наружной поверхности трубы $t_c = 30^\circ\text{C}$. Температура наружного воздуха в безветряную погоду $t_{m2} = 5^\circ\text{C}$.

Рассчитать коэффициенты теплоотдачи от газов к внутренней поверхности трубы (α_r), от наружной поверхности трубы к воздуху (α_g) и количество газа в кг, выбрасываемого за сутки в окружающую среду.

Рассчитать передаваемую через стенку труб теплоту (Q , Вт), а также лучистые составляющие коэффициентов теплоотдачи (α_{lr}) и (α_{lg}).

Задача № I-8

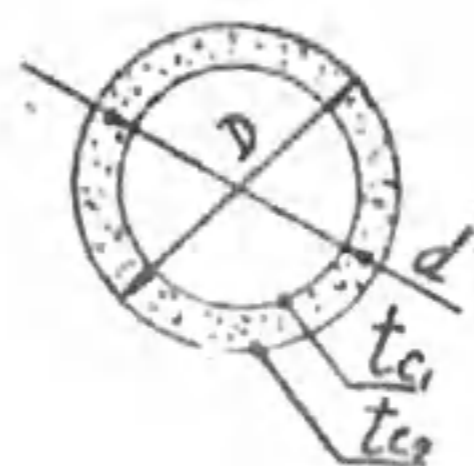


Труба с поперечными прямоугольными ребрами с целью увеличения теплосъема обдувается поперечным потоком воздуха.

Наружный диаметр трубы $d = 40$ мм, длина $l_{пр} = 9$ м, размеры ребер $a \times b \times \delta = 150 \times 200 \times 5$ мм, количество ребер $n = 600$, температура воздушного потока $t_m = 20^\circ\text{C}$, скорость воздуха $w = 8$ м/с, средняя температура оребренной поверхности $t_c = 80^\circ\text{C}$.

Рассчитать коэффициенты теплоотдачи от ребер (α_p) и от межреберной поверхности (α_c), а также конвективную теплоотдачу (Q_k , Вт) от оребренной трубы. Материал - чугун.

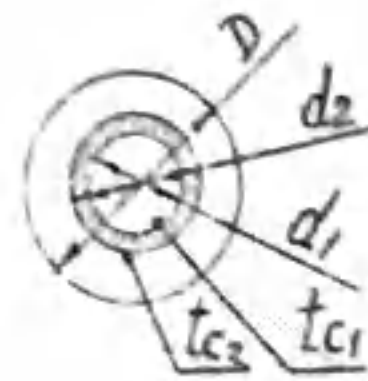
Задача № I-9



Горячая труба наружным диаметром $d = 160$ мм, с температурой наружной поверхности $t_{c1} = 300^\circ\text{C}$ в целях уменьшения теплотерь в цилиндрический кожух с внутренним диаметром $D = 200$ мм. Между трубой и кожухом - спокойный воздух. Температура внутренней поверхности кожуха $t_{c2} = 40^\circ\text{C}$.

Рассчитать теплотери в окружающую среду (Q , Вт/м). Учесть теплообмен излучением. Степени черноты поверхностей трубы и кожуха принять соответственно $\epsilon_1 = 0,94$, $\epsilon_2 = 0,532$. Как изменится Q , Вт/м, если между трубой и кожухом будет вода?

Задача № I-10

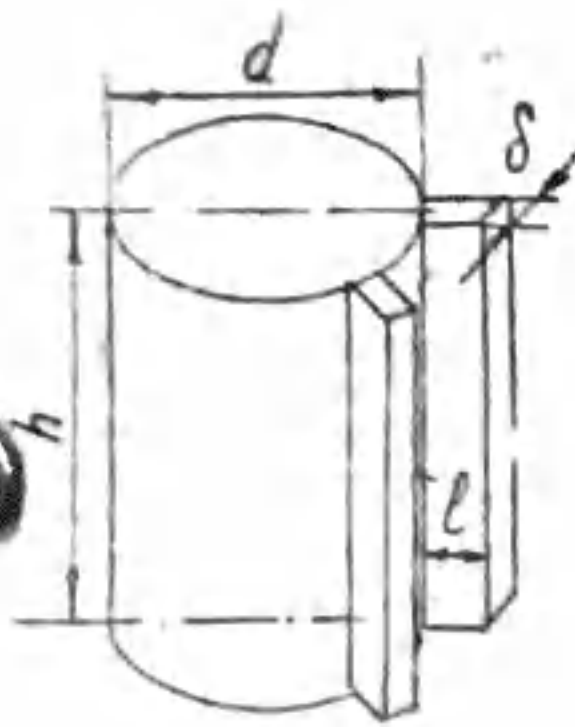


Теплообменное устройство типа "труба в трубе" предназначено для нагрева технической воды за счет охлаждения конденсата воды. Конденсат воды проходит по внутренней трубе, техническая вода - по кольцевому зазору.

Трубы стальные, диаметры внутренней трубы $d_1 = 20$ мм, $d_2 = 24$ мм, внутренний диаметр наружной трубы $D = 38$ мм, средняя температура конденсата $t_{m1} = 90^\circ\text{C}$, скорость $w_1 = 0,8$ м/с, средняя температура технической воды $t_{m2} = 60^\circ\text{C}$, скорости $w_2 = 0,3$ м/с.

Рассчитать коэффициенты теплоотдачи от конденсата к внутренней поверхности трубы (α_1) и от наружной поверхности внутренней трубы к технической воде (α_2), а также передаваемую теплоту через стенку трубы (Q , Вт/м) и температуры t_{c1} и t_{c2} .

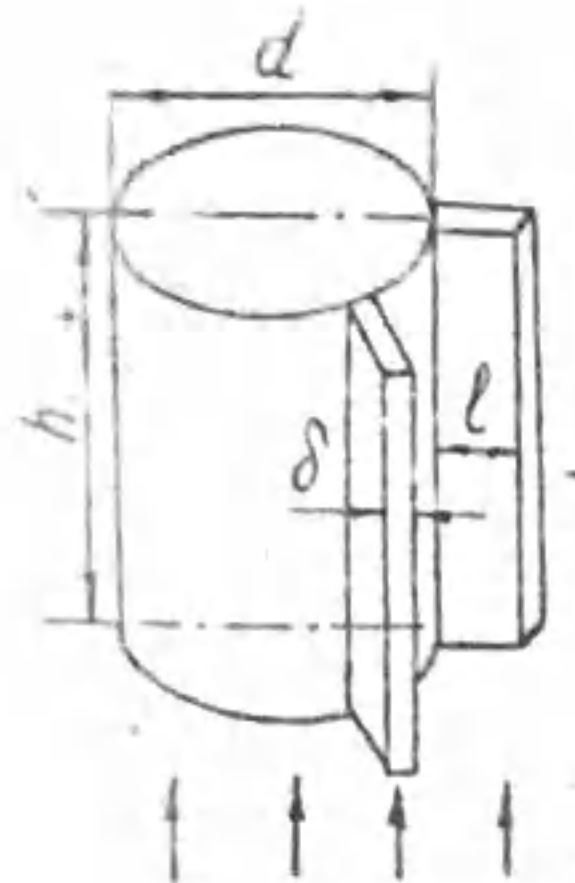
Задача № I-11



Электрический аппарат помещен в цилиндрический кожух из меди с прямыми ребрами. Число ребер $n = 24$, $h = 55$ см, $l = 110$ мм, $d = 30$ см, $\delta = 3$ мм. Температура наружной поверхности кожуха 50°C , температура воздуха $t_m = 15^\circ\text{C}$.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи от ребер (α_p) и от межреберной поверхности (α_c), а также конвективную теплоотдачу (Q , Вт) от оребренного кожуха.

Задача № I-12

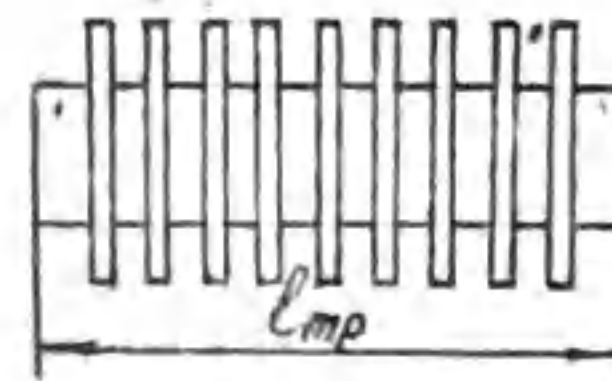


Электрический аппарат помещен в цилиндрический кожух с прямыми ребрами. Для улучшения охлаждения оребренный кожух обдувается с помощью вентилятора продольным потоком воздуха, скорость воздуха $w = 10$ м/с, температура $t_g = 20^\circ\text{C}$.

Температура на поверхности кожуха (у основании ребер) 80°C , число ребер 24, $h = 55$ см, $l = 110$ мм, толщина ребер $\delta = 3$ мм, диаметр кожуха $d = 30$ см, материал - бронза.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности (α) и конвективную теплоотдачу (Q , Вт).

Задача № I-13



Чугунная труба длиной $l_{TP} = 3$ м наружным диаметром $d = 80$ мм имеет 200 ребер диаметром $D = 120$ мм, толщиной $\delta = 2$ мм. Температура наружной поверхности трубы 70°C . Температура воздуха $t_m = 0^\circ\text{C}$. Рассчитать коэффициент теплоотдачи от ребер (α_p) и от межреберной поверхности (α_c), а также конвективную теплоотдачу от оребренной трубы (Q , Вт).

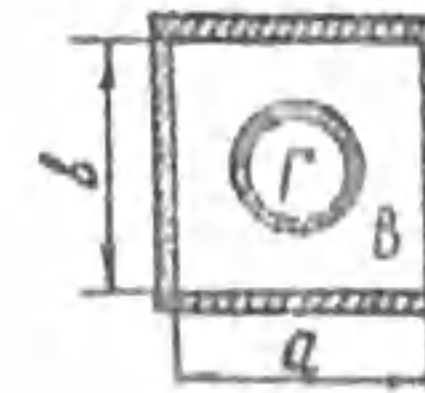
Задача № I-14

Колонка тепловыделяющего устройства имеет форму цилиндра высотой $h = 45$ см, диаметром $d = 10$ см. Ориентация вертикальная. Температура на поверхности колонки по технологическим условиям работы постоянна и равна $t_c = 80^\circ\text{C}$.

Рассчитать конвективную теплоотдачу (Q , Вт) от поверхности колонки к воздуху с температурой $t_g = 20^\circ\text{C}$ для следующих условий охлаждения: а) воздух спокойный; б) колонка обдувается поперечным потоком воздуха со скоростью $w = 10$ м/с; в) колонка обдувается продольным потоком воздуха с той же скоростью.

На основании полученных результатов сделать выводы.

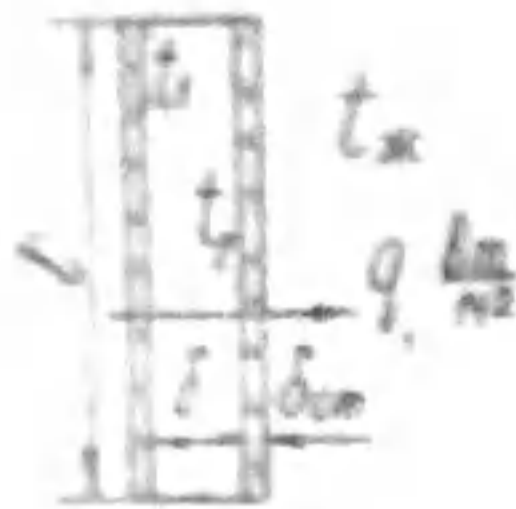
Задача № I-15



Горячая труба диаметром $d_1 = 140$ мм, $d_2 = 150$ мм, расположена внутри кожуха с размерами по внутренней поверхности $a = 230$ мм, $b = 250$ мм. Внутри трубы движутся дымовые газы со скоростью $w_1 = 15$ м/с и средней температурой $t_r = 350^\circ\text{C}$. Между трубой и кожухом в противоположном направлении движется воздух со скоростью $w_2 = 5$ м/с, средней температурой $t_g = 210^\circ\text{C}$.

Рассчитать коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к поверхности трубы (α_r) и от поверхности трубы к воздуху (α_g).

Задача № I-16



Через двойное оконное стекло теплота из помещения передается в окружающую среду. $t_1 = 10^\circ\text{C}$, $t_2 = -20^\circ\text{C}$, размеры оконного проема $l \times b = 3 \times 2 \text{ м}$, $\delta = 200 \text{ мм}$, $\delta_{\text{ст}} = 3 \text{ мм}$.

Рассчитать тепловой поток (Q , Вт), передаваемый через воздушный промежуток между стеклами.

Учесть теплообмен излучением.

Каков перепад температур по толщине стекла

Рассчитать коэффициент теплоотдачи от поверхности наружного стекла в окружающую среду для ветряной погоды при горизонтальном направлении воздушного потока с температурой $t_{\text{в}} = -25^\circ\text{C}$ при скорости ветра $w = 15 \text{ м/с}$.

Задача № I-17

Труба с температурой наружной поверхности $t_c = 90^\circ\text{C}$ находится в спокойной жидкости с $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи (α) и тепловой поток (Q , Вт/м) для следующих вариантов:

Номер варианта	Ориентация трубы	d , мм	Жидкость	α , Вт/м ² ·°C	Q , Вт/м
1	Горизонт.	32	Воздух		
2	Горизонт.	50	Воздух		
3	Горизонт.	32	Вода		
4	Вертикаль.	32	$l = 3 \text{ м}$, воздух		

Для вариантов 1, 2, 4 учесть теплообмен излучением. Труба стальная окисленная.

Результаты расчета занести в таблицу. На основании полученных результатов сделать выводы о том, какие факторы влияют на коэффициент теплоотдачи.

Задача № I-18

Шаровой калориметр (медь полированная) диаметром $d = 60 \text{ мм}$ с температурой поверхности $t_c = 80^\circ\text{C}$ в опыте по экспериментальному определению теплофизических свойств охлаждается при естественной конвекции: а) на воздухе с $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$; б) в воде с $t_{\text{ж}} = 10^\circ\text{C}$.

Рассчитать коэффициенты теплоотдачи к воздуху ($\alpha_{\text{в}}$) и к воде

(α).

Определить лучистую составляющую коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{\text{л}}$) при охлаждении шарового калориметра на воздухе.

Задача № I-19

Пучок труб омывается поперечным потоком дымовых газов со скоростью w . Температура дымовых газов $t_{\text{г}} = 250^\circ\text{C}$, температура наружной поверхности труб $t_c = 80^\circ\text{C}$. Число рядов $n = 8$, наружный диаметр труб d , поперечный и продольный шаги $s_1 = 2d$, $s_2 = 1,5d$.

Определить коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к трубам пучка для следующих вариантов:

Номер варианта	Тип пучка	w , м/с	d , мм	$\alpha_{\text{пуч}}$, Вт/м ² ·°C
1	Шахматн.	15	48	
2	Шахматн.	2	48	
3	Шахматн.	15	32	
4	Коридорн.	15	48	

Учесть теплообмен излучением. Состав дымовых газов приведен в справочных таблицах. Трубы стальные шероховатые окисленные.

Результаты расчета занести в таблицу. На основании полученных результатов сделать выводы о том, какие факторы влияют на коэффициент теплоотдачи.

Задача № I-20

Трубка длиной $l = 1 \text{ м}$ с наружным диаметром d омывается поперечным потоком жидкости со скоростью w . Температура на поверхности трубки t_c , температура жидкости $t_{\text{ж}}$.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи (α), коэффициент $\xi = \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c}\right)^{0,25}$ и тепловой поток (Q , Вт) для следующих вариантов:

№ вар.	Жидкость	d , мм	w , м/с	t_c , °C	$t_{\text{ж}}$, °C	α , Вт/м ² ·°C	Q , Вт
1	Воздух	52	10	70	10		
2	Воздух	30	10	70	10		
3	Воздух	52	15	70	10		
4	Вода	52	10	70	10		
5	Вода	52	10	70	10		

Для вариантов 1, 2, 3 учесть теплообмен излучением. Трубка латунная, поверхность тусклая.

Результаты расчета занести в таблицу. На основании полученных результатов сделать выводы о том, какие факторы влияют на коэффициент теплоотдачи.

Задача № I-21

Трубка длиной l с наружным диаметром $d = 10$ мм обтекается продольным потоком жидкости со скоростью w . Температура наружной поверхности трубки t_c , температура жидкости t_m .

Рассчитать коэффициент теплоотдачи (α), коэффициент $\xi_t = \left(\frac{Pr_m}{Pr_c}\right)^{0,25}$ и тепловой поток (Q , Вт) для следующих вариантов:

№ вар.	Жидкость	$l, м$	$w, м/с$	$t_c, °C$	$t_m, °C$	$d, мм$	$Q, Вт$	ξ_t
1	Вода	1,0	1	20	60			
2	Вода	1,5	1	20	60			
3	Вода	1,0	3	20	60			
4	Воздух	1,0	1	20	60			
5	Вода	1,0	1	60	20			

Для варианта 4 учесть теплообмен излучением. Трубка латунная, поверхность тусклая. Результаты расчета занести в таблицу.

На основании полученных результатов сделать выводы о том, какие факторы влияют на коэффициент теплоотдачи.

Задача № I-22

Через плоскую прослойку жидкости толщиной δ при естественной конвекции передается теплота от нагретой поверхности с температурой t_1 к поверхности с температурой $t_2 = 20°C$.

Рассчитать плотность теплового потока ($q, \frac{Вт}{м^2}$) для следующих вариантов:

№ вар.	Жидкость	$\delta, мм$	$t_1, °C$	$q, \frac{Вт}{м^2}$
1	Воздух	20	100	
2	Воздух	40	100	
3	Воздух	20	40	
4	Вода	20	100	

Для вариантов 1, 2, 3 учесть теплообмен излучением. Степени черноты поверхностей $\epsilon_1 = 0,85$, $\epsilon_2 = 0,55$. Результаты расчета занести в

таблицу. На основании полученных результатов сделать выводы.

Задача № I-23

Определить средний коэффициент теплоотдачи (α) и плотность теплового потока ($q, \frac{Вт}{м^2}$) при естественной конвекции от вертикальной плиты высотой l с температурой поверхности $t_c = 110°C$ к жидкости $t_m = 20°C$ для следующих вариантов:

№ вар.	$l, м$	Жидкость	$\alpha, \frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	$q, \frac{Вт}{м^2}$
1	4	Вода		
2	4	Воздух		
3	2	Воздух		

Для вариантов 2, 3 учесть теплообмен излучением. Плита стальная окисленная шероховатая. Результаты расчета занести в таблицу. На основании полученных результатов сделать выводы.

Задача № I-24

Для охлаждения трансформатора по трубе с внутренним диаметром $d = 30$ мм подается трансформаторное масло с $T_m = 10°C$.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи и расход масла ($G, кг/с$): а) при ламинарном режиме течения масла; б) при турбулентном режиме. Температуру внутренней поверхности трубы принять $20°C$.

Задача № I-25

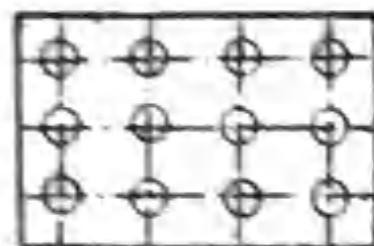
Поперечный поток дымовых газов с температурой $t_m = 500°C$ омывает пучок оребренных труб водного экономайзера. Наружный диаметр труб $d = 42$ мм, ребра круглые диаметром D , шаг ребер u . Скорость газа в узком сечении канала $w = 10$ м/с.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи к оребренным трубам 3-го и последующего рядов для следующих вариантов:

№ вар.	Пучок	$D, мм$	$u, мм$	$\alpha, \frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$
1	Шахматн.	68	10	
2	Коридорн.	68	10	
3	Шахматн.	60	10	
4	Шахматн.	68	15	

Результаты расчета занести в таблицу. На основании полученных результатов сделать выводы о том, какие факторы влияют на коэффициент теплоотдачи.

Задача № I-26



Горячие трубы воздухоподогревателя омываются продольным потоком воздуха. Трубы стальные, количество труб $n = 12$, диаметр труб $d_1 = 94$ мм, $d_2 = 100$ мм, длина $l = 5$ м, скорость воздуха $w = 10$ м/с, средняя температура воздуха 280°C . Температура на внутренней поверхности труб $t_{c1} = 350^\circ\text{C}$.

Рассчитать температуру на наружной поверхности труб (t_{c2}) и конвективную теплоотдачу (Q , Вт) от поверхности труб к потоку воздуха. Излучением пренебречь.

Задача № I-27

По воздухопроводу прямоугольного сечения с внутренними размерами $a \times b = 150 \times 200$ мм передается воздух со скоростью $w = 10$ м/с. Температура воздуха $t_m = 60^\circ\text{C}$, температура внутренней поверхности воздухопровода $t_c = 30^\circ\text{C}$.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, отнесенный к 1 м длины воздухопровода.

Объясните смысл коэффициента $\epsilon_t = \left(\frac{Pr_m}{Pr_c}\right)^{0,25}$, сравните этот коэффициент для воздуха и воды при данных температурах. Сделайте выводы.

Задача № I-28

По трубе с внутренним диаметром d_1 передается жидкость с температурой $t_m = 60^\circ\text{C}$ и скоростью w . Температура внутренней поверхности трубы $t_c = 30^\circ\text{C}$. Рассчитать коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, отнесенный к 1 м длины трубы, для следующих вариантов:

№ вар.	Жидкость	w , м/с	d_1 , мм	α , Вт/м ² ·°C	Q , Вт/м
1	Трансф.масло	5	20		
2	Трансф.масло	5	40		
3	Воздух	15	20		
4	Трансф.масло	0,5	20		

Результаты расчетов занести в таблицу. На основании полученных результатов сделать выводы о том, какие факторы влияют на коэффициент теплоотдачи.

Задача № I-29

По каналу кольцевого сечения теплообменника "труба в трубе" течет жидкость со скоростью w . Средняя температура жидкости t_m , средняя температура наружной поверхности внутренней трубы t_c . Диаметры кольцевого канала равны соответственно d и $D = 38$ мм.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи к жидкости в кольцевом канале для следующих вариантов:

Номер варианта	Жидкость	d , мм	w , м/с	t_c , °C	t_m , °C	α , Вт/м ² ·°C
1	Вода	24	0,7	90	40	
2	Вода	28	0,7	90	40	
3	Вода	24	1,0	90	40	
4	Вода	24	0,7	40	90	
5	Воздух	24	0,7	90	40	

Результаты расчетов занести в таблицу. На основании полученных результатов сделать выводы о том, какие факторы влияют на коэффициент теплоотдачи.

Задача № I-30

В трубе с внутренним диаметром d течет трансформаторное масло со скоростью w , с температурой $t_m = 60^\circ\text{C}$. Температура внутренней поверхности трубы $t_c = 30^\circ\text{C}$. Рассчитать коэффициент теплоотдачи и тепловой поток (Q , Вт/м) для следующих вариантов:

Номер варианта	w , м/с	Труба	d , мм	R , мм	α , Вт/м ² ·°C	Q , Вт/м
1	0,5	прямая	20	-		
2	10	прямая	20	-		
3	0,5	прямая	40	-		
4	0,5	змеевиковая	20	40		

Результаты расчета занести в таблицу. На основании полученных результатов сделать выводы о том, какие факторы влияют на коэффициент теплоотдачи.

Задача # I-31

Рассчитать температуру (t_c) на наружной поверхности трубки, обогреваемой электрическим нагревателем. Наружная поверхность трубки охлаждается поперечным потоком воздуха.

Трубка латунная, поверхность туская, $d_2 = 40$ мм, $l = 1$ м, $N = 40$ Вт. Воздух: $\bar{t}_m = 20^\circ\text{C}$, $w = 1$ м/с.

Как изменится температура поверхности трубки (t_c'), если ее покрыть слоем изоляции $\delta_{из} = 20$ мм, $\lambda_{из} = 0,2$ Вт/м $^\circ\text{C}$, $\epsilon_{из} = 0,95$. Учесть теплоотдачу излучением.

Задача # I-32

Рассчитать температуру на наружной поверхности вертикальной трубки (t_{c2}) и перепад температур по толщине стенки ($t_{c1} - t_{c2}$), если через трубку пропускается электрический ток. Трубка находится в трансформаторном масле и охлаждается только по наружной поверхности.

Трубка: $d_2/d_1 = 40/32$ мм, $l = 0,5$ м, $\lambda = 30$ Вт/м $^\circ\text{C}$, $N = 100$ Вт.

Трансформаторное масло: $t_m = 20^\circ\text{C}$.

Задача # I-33

Рассчитать температуру на поверхности (t_c) и в центре (t_y) тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) в форме цилиндра, охлаждаемого водой. Вода движется по кольцевому каналу между ТВЭЛом и оболочкой (внутренней поверхностью трубы).

ТВЭЛ: $d = 21$ мм, $q_v = 4,9 \cdot 10^7$ Вт/м 3 , $\lambda = 31$ Вт/м $^\circ\text{C}$.

Оболочка: внутренний диаметр трубы $D = 30$ мм.

Вода: $w = 0,7$ м/с, $t_m = 50^\circ\text{C}$.

Задача # I-34

Рассчитать температуру (t_c) на наружной поверхности трубки, обогреваемой электрическим нагревателем. Наружная поверхность трубки (латунь туская) охлаждается продольным потоком воздуха.

Трубка: $d = 24$ мм, $l = 0,5$ м, $N = 60$ Вт.

Воздух: $\bar{t}_m = 10^\circ\text{C}$, $w = 10$ м/с.

Как изменится температура поверхности трубки (t_c'), если ее покрыть слоем изоляции $\delta_{из} = 10$ мм, $\lambda_{из} = 0,15$ Вт/м $^\circ\text{C}$, $\epsilon_{из} = 0,97$. Учесть теплоотдачу излучением.

Задача # I-35

Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) в форме трубы по наружной поверхности теплоизолирован. Внутренняя поверхность ТВЭЛа охлаждается водой.

Рассчитать температуру внутренней поверхности (t_{c1}), а также разность температур наружной и внутренней поверхностей ТВЭЛа ($t_{c2} - t_{c1}$).

ТВЭЛ: $d_2/d_1 = 26/16$ мм, $q_v = 5 \cdot 10^7$ Вт/м 3 , $\lambda = 20$ Вт/м $^\circ\text{C}$.
Вода: $\bar{t}_m = 95^\circ\text{C}$, $w_2 = 2$ м/с.

Задача # I-36

Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) ядерного реактора в форме трубы по наружной поверхности теплоизолирован. Внутренняя поверхность ТВЭЛа охлаждается водой.

Какова температура внутренней поверхности ТВЭЛа (t_{c1}) и наружной поверхности (t_{c2})?

ТВЭЛ: $d_2/d_1 = 26/16$ мм, $q_v = 5 \cdot 10^7$ Вт/м 3 , $\lambda = 25$ Вт/м $^\circ\text{C}$.
Вода: $\bar{t}_m = 95^\circ\text{C}$, $w_2 = 2$ м/с.

Задача # I-37

Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) ядерного реактора в форме цилиндра охлаждается по наружной поверхности водой. Вода движется по кольцевому каналу между ТВЭЛом и оболочкой (внутренней поверхностью трубы). Рассчитать температуру на поверхности ТВЭЛа (t_c).

ТВЭЛ: $d = 21$ мм, $q_v = 4,9 \cdot 10^7$ Вт/м 3

Внутренний диаметр трубы $D = 30$ мм

Вода: $w = 0,7$ м/с, $t_m = 50^\circ\text{C}$.

Задача # I-38

Через трубку, заглушенную с торцов, пропускается электрический ток. Трубка находится в трансформаторном масле. Рассчитать температуру на наружной поверхности трубки (t_c).

Трубка горизонтальная: $l = 0,5$ м, $d_2 = 40$ мм, $N = 100$ Вт.
Трансформаторное масло: $t_m = 20^\circ\text{C}$.

Задача № I-39

Определить теплотери (Q , Вт/м) горизонтального теплообменника в форме цилиндра в окружающую среду.

Теплообменник: поверхность окрашена масляной краской, $d = 400$ мм, $t_c = 200^\circ\text{C}$.

Воздух: $t_g = 15^\circ\text{C}$.

На сколько уменьшатся теплотери, если теплообменник покрыть слоем тепловой изоляции $\delta_{из} = 50$ мм, $\epsilon_{из} = 0,9$, температура на поверхности изоляции $t_c = 50^\circ\text{C}$.

Учесть теплоотдачу излучением.

Задача № I-40

В горизонтальной трубе внутренним диаметром $d = 10$ мм течет вода с $t_{м1} = 30^\circ\text{C}$, расход воды $G = 7 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Температура внутренней поверхности трубы $t_c = 60^\circ\text{C}$.

Определить конвективный теплообмен (Q , Вт/м) между водой и поверхностью трубы.

РАСЧЕТ ТЕПЛОТДАЧИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Задача № 2-1

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) от горячей воды к спокойному воздуху через стенку стальной трубы и температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Вертикальная труба: поверхность стальная окисленная шероховатая, $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^\circ\text{C}$, $l = 5$ м.

Вода: $w_1 = 2$ м/с, $t_{м1} = 90^\circ\text{C}$.

Воздух: $t_{м2} = 20^\circ\text{C}$.

Учесть теплообмен излучением.

Задача № 2-2

Рассчитать теплопередачу Q (Вт) от трансформаторного масла, движущегося по трубе, к продольному потоку воздуха, омывающему наружную поверхность трубы, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Труба: поверхность стальная окисленная шероховатая, $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $l = 3$ м, $\lambda = 50$ Вт/м $^\circ\text{C}$.

Трансформаторное масло: $\bar{t}_{м1} = 100^\circ\text{C}$, $w_1 = 3$ м/с.
Поток воздуха: $t_{м2} = 30^\circ\text{C}$, $w_2 = 5$ м/с.
Учесть теплообмен излучением.

Задача № 2-3

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) от поперечного потока дымовых газов, омывающих наружную поверхность трубы, к воде, движущейся внутри трубы, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Труба: поверхность стальная окисленная шероховатая, $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^\circ\text{C}$.

Вода: $t_{м1} = 20^\circ\text{C}$, $w_1 = 1,5$ м/с.

Поток дымовых газов: $\bar{t}_{м2} = 200^\circ\text{C}$, $w_2 = 10$ м/с, степень черноты газов принять предельной.

Учесть теплообмен излучением поверхности с дымовыми газами.

Задача № 2-4

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) от поперечного потока дымовых газов, омывающих наружную поверхность трубы, к кипящей воде, движущейся внутри трубы, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Труба: поверхность стальная окисленная шероховатая, $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^\circ\text{C}$.

Кипящая вода: $p = 10$ бар, $w_1 = 0,5$ м/с.

Поток дымовых газов: $t_{м2} = 1000^\circ\text{C}$, $w_2 = 10$ м/с, степень черноты газов принять предельной.

Учесть теплообмен излучением поверхности с дымовыми газами.

Задача № 2-5

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) от горячего воздуха, движущегося внутри трубы, к кипящей воде, на наружной поверхности трубы, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Труба: $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^\circ\text{C}$.

Воздух: $t_{м1} = 1000^\circ\text{C}$, $w_1 = 10$ м/с.

Кипящая вода: $p = 1$ бар.

Задача № 2-6

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) от конденсирующегося неподвижного сухого насыщенного пара на наружной поверхности горизонтальной трубы к охлаждающей воде, движущейся внутри трубы, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Горизонтальная труба: $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С.
 Вода: $\bar{t}_{m1} = 10^{\circ}$ С, $w_1 = 3$ м/с.
 Пар: $p = 8$ бар.

Задача № 2-7

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) от конденсирующегося неподвижного сухого насыщенного пара на наружной поверхности вертикальной трубы, к охлаждающей воде, движущейся внутри трубы, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Вертикальная труба: $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $l = 3$ м, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С.
 Вода: $\bar{t}_{m1} = 10^{\circ}$ С, $w_1 = 2$ м/с.
 Пар: $p = 13$ бар.

Задача № 2-8

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) от воды, движущейся внутри вертикальной трубы к спокойному воздуху, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Вертикальная труба: поверхность стальная окисленная шероховатая, $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $l = 3$ м, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С.
 Вода: $\bar{t}_{m1} = 80^{\circ}$ С, $w_1 = 2$ м/с.
 Воздух: $t_{m2} = 10^{\circ}$ С.
 Учесть теплоотдачу излучением со стороны воздуха.

Задача № 2-9

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) от продольного потока дымовых газов, омывающих наружную поверхность трубы, к кипящей воде, движущейся внутри трубы, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Труба: поверхность стальная окисленная шероховатая, $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $l = 5$ м, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С.
 Кипящая вода: $p = 2$ бар, $w_1 = 3$ м/с.

Поток дымовых газов: $\bar{t}_{m2} = 900^{\circ}$ С, $w_2 = 15$ м/с, степень черноты газов принять предельной.
 Учесть теплообмен излучением между поверхностью трубы и дымовыми газами.

Задача № 2-10

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) от движущегося сухого насыщенного пара, который конденсируется на поверхности горизонтальной трубы, к воде, движущейся внутри трубы, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей трубы.

Труба: $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С.
 Вода: $\bar{t}_{m1} = 20^{\circ}$ С, $w_1 = 1$ м/с.
 Пар: $p = 2$ бар, $w_2 = 0,5$ м/с.

Задача № 2-11

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) от воды, движущейся внутри оребренной трубы, к спокойному воздуху, а также температуры внутренней (t_{c1}), наружной (t_{c2}) поверхностей трубы и температуру на торце ребра (t_r). Излучением от оребренной трубы пренебречь.

Горизонтальная труба с круглыми ребрами: $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С, длина трубы $l_{rp} = 3$ м, диаметр ребер $D = 80$ мм, $s = 1$ мм, число ребер $n = 500$.
 Вода: $t_{m1} = 90^{\circ}$ С, $w_1 = 2$ м/с.
 Воздух: $t_{m2} = 10^{\circ}$ С.

Задача № 2-12

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) от поперечного потока дымовых газов, омывающих коридорный пучок труб, к воде, движущейся внутри труб, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей труб 3-го и последующих рядов пучка. Учесть теплообмен излучением между дымовыми газами и трубами пучка.

Коридорный пучок: $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $s_1 = 2,5 d_2$, $s_2 = 2 d_2$, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С, $\epsilon_c = 0,95$.
 Вода: $\bar{t}_{m1} = 50^{\circ}$ С, $w_1 = 0,5$ м/с.
 Дымовые газы: $\bar{t}_{m2} = 1000^{\circ}$ С, $w_2 = 10$ м/с, состав дымовых газов приведен в справочных таблицах.
 Учесть теплообмен излучением между поверхностью труб и дымовыми газами.

Задача № 2-13

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) от поперечного потока дымовых газов, омывающих пакетный пучок труб, к воде, движущейся внутри труб, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей труб 3-го и последующих рядов пучка. Учесть теплообмен излучением между дымовыми газами и трубами пучка.

Пакетный пучок: $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С, $S_1 = S_2 = 1,3 d_2$, $\epsilon_c = 0,9$.

Вода: $\bar{t}_{m1} = 90^{\circ}$ С, $w_1 = 1$ м/с.

Дымовые газы: $\bar{t}_{m2} = 800^{\circ}$ С, $w_2 = 8$ м/с, состав дымовых газов приведен в справочных таблицах.

Учесть теплообмен излучением между поверхностью труб и дымовыми газами.

Задача № 2-14

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) через стенку горизонтально расположенного газохода от дымовых газов, движущихся по газоходу, к спокойному воздуху, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей газохода.

Газоход: размеры по внутреннему периметру $a \times b = 2 \times 3$ м 2 , толщина стенки $\delta = 500$ мм, материал - огнеупорный кирпич, $\lambda = 0,8$ Вт/м $^{\circ}$ С.

Дымовые газы: $\bar{t}_{m1} = 600^{\circ}$ С, $w = 2$ м/с, состав дымовых газов приведен в справочных таблицах.

Воздух: $t_{m2} = 20^{\circ}$ С.

Учесть теплообмен излучением внутри и снаружи газохода.

Задача № 2-15

Рассчитать теплопередачу Q (Вт/м) через стенку водо-водяного теплообменника типа "труба в трубе" от горячей воды, (конденсата) движущейся внутри трубы, к холодной воде, движущейся в кольцевом зазоре между трубами, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей внутренней трубы.

Внутренняя труба: $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С.

Наружная труба: внутренний диаметр $D = 50$ мм.

Горячая вода (конденсат): $\bar{t}_{m1} = 90^{\circ}$ С, $w_1 = 0,7$ м/с.

Холодная вода: $\bar{t}_{m2} = 20^{\circ}$ С, $w_2 = 1$ м/с.

Задача № 2-16

Рассчитать теплопередачу q (Вт/м 2) через вертикальную плоскую стенку от продольного потока дымовых газов к спокойному воздуху, а также температуры поверхностей стенки со стороны газов (t_{c1}) и со стороны воздуха (t_{c2}).

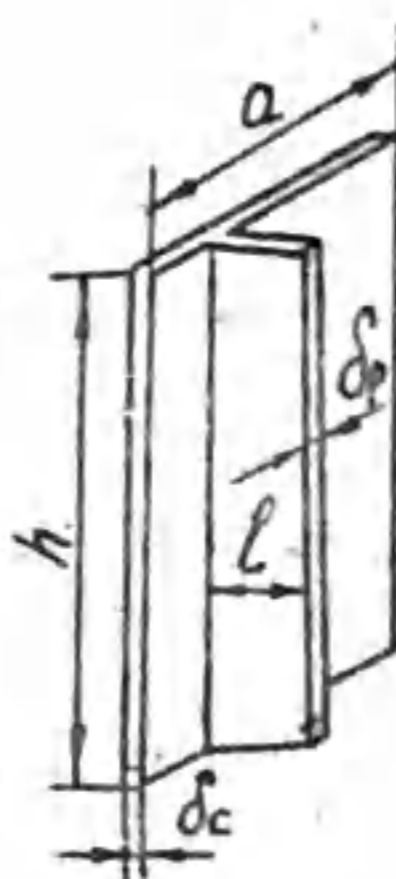
Вертикальная стенка: поверхность стальная окисленная шероховатая, $\delta = 5$ мм, $h = 3$ м, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С.

Поток дымовых газов: $t_{m1} = 200^{\circ}$ С, $w_1 = 10$ м/с, степень черноты газов принять предельной.

Воздух: $t_{m2} = 20^{\circ}$ С.

Учесть теплоотдачу излучением на поверхностях стенки.

Задача № 2-17



Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) через вертикальную оребренную стенку от продольного потока горячей воды к спокойному воздуху, а также температуры на поверхностях стенки со стороны воды (t_{c1}) и со стороны воздуха (t_{c2}), температуру на торце ребра (t_r).

Теплообмен излучением между поверхностью оребренной стенки и воздухом пренебречь.

Вертикальная плоская оребренная стенка: $\delta_c = 5$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С, высота $h = 5$ м, ширина $a = 4$ м, ребра вертикальные, длина ребер $l = 100$ мм, толщина ребер $\delta_p = 3$ мм, число ребер

$n = 200$. Вода: $\bar{t}_{m1} = 80^{\circ}$ С, $w_1 = 2$ м/с. Воздух: $t_{m2} = 20^{\circ}$ С.

Задача № 2-18

Рассчитать теплопередачу (q , Вт/м 2) через плоскую стенку от продольного потока дымовых газов к кипящей воде, а также температуры поверхностей стенки со стороны газов t_{c1} и со стороны воды t_{c2} .

Плоская стенка: поверхность стальная окисленная шероховатая, $\delta = 10$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м $^{\circ}$ С, $l = 5$ м.

Дымовые газы: $t_{m1} = 800^{\circ}$ С, $w_1 = 18$ м/с, степень черноты газов принять предельной.

Кипящая вода: $p = 2$ бар.

Учесть теплоотдачу излучением между поверхностью стенки и газами.

Задача № 2-19

Рассчитать теплопередачу (q , Вт/м²) через вертикальную плоскую стенку от конденсирующегося неподвижного сухого насыщенного пара к продольному потоку воды, омывающей противоположную поверхность стенки, а также температуры поверхностей со стороны пара (t_{c1}) и со стороны воды (t_{c2}).

Стенка: $\delta = 10$ мм, $h = 4$ м, $\lambda = 50$ Вт/м·°С.

Пар: $p = 8$ бар.

Вода: $\bar{t}_{m2} = 10$ °С, $w_2 = 5$ м/с.

Задача № 2-20

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) через стенку вертикальной пластины от продольного потока горячей воды к спокойному воздуху, а также температуры поверхностей пластины со стороны воды (t_{c1}) и со стороны воздуха (t_{c2}).

Вертикальная пластина: поверхность стальная окисленная шероховатая, высота $l = 5$ м, ширина $b = 4$ м, толщина $\delta = 10$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м·°С.

Горячая вода: $\bar{t}_{m1} = 90$ °С, $w_1 = 2$ м/с.

Воздух: $\bar{t}_{m2} = 20$ °С.

Учесть теплоотдачу излучением со стороны воздуха.

Задача № 2-21

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) через стенку наклонной пластины от конденсирующегося неподвижного сухого насыщенного пара к охлаждающей воде, а также температуры поверхностей пластины со стороны пара (t_{c1}), со стороны воды (t_{c2}) и количество пара, конденсирующегося на поверхности за 1 час.

Пластина: длина $l = 5$ м, толщина $\delta = 10$ мм, ширина $b = 4$ м, угол наклона поверхности к вертикали $\psi = 45$ °, $\lambda = 50$ Вт/м·°С.

Пар: $p = 1$ бар.

Вода: $\bar{t}_{m2} = 10$ °С, $w_2 = 2$ м/с.

Задача № 2-22

Определить теплопередачу (Q , Вт) через стенку вертикальной пластины от продольного потока дымовых газов к спокойному воздуху, а также температуры поверхностей пластины со стороны газов (t_{c1}) и со стороны воздуха (t_{c2}).

Пластина: поверхность стальная окисленная шероховатая, длина $l = 5$ м, ширина $b = 3$ м, толщина $\delta = 10$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м·°С.
 Дымовые газы: $\bar{t}_{m1} = 500$ °С, $w_1 = 15$ м/с, степень черноты газов принять предельной.
 Воздух: $\bar{t}_{m2} = 20$ °С.
 Учесть теплоотдачу излучением на поверхностях пластины.

Задача № 2-23

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) через стенку трубы коридорного пучка от сухого насыщенного пара, движущегося сверху вниз и конденсирующегося на поверхности горизонтальных труб, и охлаждающей воде, движущейся внутри труб, а также температуры внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверхностей труб.

Коридорный пучок: $d_2/d_1 = 40/36$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м·°С, число рядов по высоте пучка $n = 20$.

Пар: $p = 2$ бар; степень конденсации $\epsilon = 1$, $w_1 = 20$ м/с.

Вода: $\bar{t}_{m2} = 10$ °С, $w_2 = 2$ м/с.

Задача № 2-24

Трубопровод горячего воздуха для уменьшения тепловых потерь помещен в цилиндрический кожух.

Определить тепловые потери с 1 м длины (Q , Вт/м) кожуха и температуры на наружной поверхности кожуха (t_k) и наружной поверхности трубы (t_c).

Трубопровод (чугун окисленный): $d_1 = 54$ мм, $d_2 = 60$ мм, $\lambda = 30$ Вт/м·°С.

Кожух (никель окисленный): $\delta_k = 1$ мм, $\lambda = 58$ Вт/м·°С.

Ширина воздушного зазора $\delta_1 = 15$ мм.

Горячий воздух: $\bar{t}_{m1} = 800$ °С, $w_1 = 140$ м/с.

Атмосферный воздух: $\bar{t}_{m2} = 20$ °С.

Учесть теплообмен излучением.

Задача № 2-25

Определить теплотери (Q , Вт) через оконный проем ($F = 2 \times 3$ м²) с двойными рамами. Учесть теплообмен излучением.

Оконное стекло: $\delta = 2$ мм, $\lambda = 0,74$ Вт/м·°С.

Температура воздуха в помещении $t_{m1} = 20$ °С.

Температура наружного воздуха: $t_{m2} = -30$ °С, скорость ветра

(продольный горизонтальный поток) $w = 15$ м/с.

Ширина воздушного зазора между стеклами $\delta_2 = 20$ мм.

Задача № 2-26

По воздухопроводу горячий воздух передается из одного цеха в другой. Рассчитать теплотери (Q , Вт/м). На сколько градусов уменьшится температура воздуха на участке воздухопровода длиной $l = 53$ м, расположенного на открытом воздухе? Какова средняя температура стенки воздухопровода?

Горячий воздух: $\bar{t}_{m1} = 250^\circ\text{C}$, $w_1 = 13$ м/с.

Атмосферный воздух: $t_{m2} = -10^\circ\text{C}$, скорость ветра $w_2 = 10$ м/с, учесть направление ветра, приняв угол атаки $\psi = 30^\circ$.

Воздуховод (никель окисленный): живое сечение 27×40 см², толщина стенки $\delta = 2$ мм, $\lambda = 30$ Вт/м²·°C.

Учесть теплоотдачу излучением на наружной поверхности воздухопровода.

Задача № 2-27

По теплоизолированному трубопроводу, расположенному на эстакадах передается горячая вода.

Рассчитать теплотери Q , Вт/м и температуру на поверхности изоляции (t_{uz}). На сколько градусов понижается температура воды на каждые 500 м длины трубопровода?

Трубопровод: $d_1 = 345$ мм, $d_2 = 351$ мм, $\lambda = 40$ Вт/м²·°C.

Двухслойная тепловая изоляция: $\delta_1 = 50$ мм, $\lambda_1 = 0,07$ Вт/м²·°C, $\delta_2 = 30$ мм, $\lambda_2 = 0,12$ Вт/м²·°C.

Горячая вода: $\bar{t}_{m1} = 80^\circ\text{C}$, $w_1 = 1,2$ м/с.

Атмосферный воздух: $t_{m2} = 10^\circ\text{C}$, скорость ветра $w_2 = 15$ м/с, направление ветра учесть, приняв угол атаки $\psi = 45^\circ$.

Задача № 2-28

Рассчитать теплоту (Q , Вт), передаваемую через стенку латунной трубки конденсатора от конденсирующего пара внутри трубки к продольному потоку воды, омывающему трубку, и температуры на поверхностях трубки t_{c1} и t_{c2} .

Трубе: $d_1 = 40$ мм, $d_2 = 42$ мм, $l = 5$ м, $\lambda = 85,5$ Вт/м²·°C.

Пар: $w_m = 60$ м/с, $P = 2,7$ бар, $x_1 = 1,0$, $x_2 = 0$.

Вода: $\bar{t}_{m2} = 40^\circ\text{C}$, $w_2 = 1$ м/с.

Задача № 2-29

По теплоизолированному трубопроводу, расположенному на эстакадах, передается горячая вода. Рассчитать теплотери (Q , Вт/м).

температуру на поверхности изоляции (t_{uz}). На сколько градусов понижается температура воды на каждые 500 м длины трубы?

Трубопровод: $d_1 = 345$ мм, $d_2 = 351$ мм, $\lambda = 40$ Вт/м²·°C.

Двухслойная тепловая изоляция покрыта черной матовой краской, $\delta_1 = 60$ мм, $\lambda_1 = 0,06$ Вт/м²·°C, $\delta_2 = 40$ мм, $\lambda_2 = 0,15$ Вт/м²·°C.

Горячая вода: $\bar{t}_{m1} = 80^\circ\text{C}$, $w_1 = 0,8$ м/с.

Атмосферный воздух: $t_{m2} = 10^\circ\text{C}$.

Учесть теплоотдачу излучением на поверхности тепловой изоляции.

Задача № 2-30

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) от горячей воды к поперечному потоку воздуха через стенку стальной оребренной трубы коридорного пучка. Теплообменом излучением пренебречь.

Труба: $d_2/d_1 = 20/18$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м²·°C, длина трубы $l_{tp} = 4$ м, диаметр ребра $D = 40$ мм, $\delta_p = 1$ мм, шаг ребер $u = 5$ мм.

Вода: $\bar{t}_{m1} = 80^\circ\text{C}$, $w_1 = 2$ м/с.

Воздух: $t_{m2} = 20^\circ\text{C}$, $w_2 = 12$ м/с.

Задача № 2-31

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) от поперечного потока дымовых газов к воде через стенку оребренной трубы водяного экономайзера.

Трубы расположены в шахматном порядке.

Теплообменом излучением пренебречь.

Труба: $d_2/d_1 = 26/24$ мм, $\lambda = 40$ Вт/м²·°C, $l_{tp} = 5$ м, ребра поперечные квадратные со стороной $A = 50$ мм, $\delta_p = 1$ мм, шаг ребер $u = 7$ мм.

Вода: $\bar{t}_{m1} = 60^\circ\text{C}$, $w_1 = 1$ м/с.

Дымовые газы: $w_2 = 10$ м/с, $\bar{t}_{m2} = 430^\circ\text{C}$.

Задача № 2-32

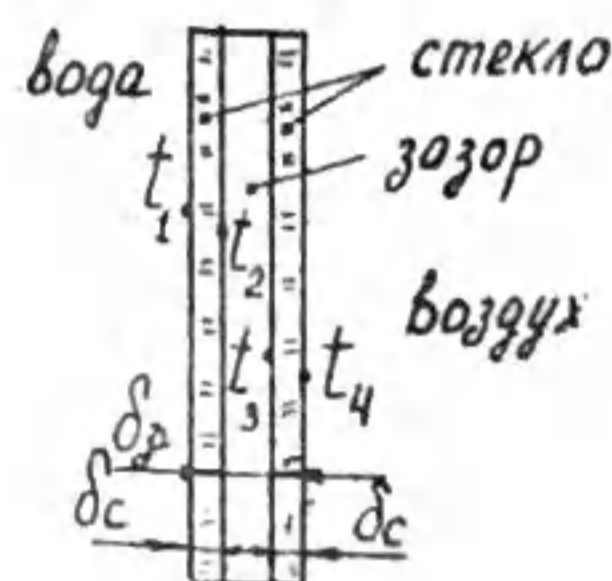
Рассчитать теплопередачу (q , Вт/м²) через вакуумированную плоскую стенку из кварцевого стекла от горячей воды к воздуху, а также температуры на поверхностях t_1 , t_2 , t_3 , t_4 .

Вертикальная стенка: $\delta_c = 3$ мм, $l = 1,5$ м, $\lambda_c = 1,35$ Вт/м²·°C, $\epsilon_c = 0,94$.

Ширина вакуумированного зазора $\delta_z = 3$ мм.

Горячая вода: $\bar{t}_{m1} = 90^\circ\text{C}$. Воздух: $t_{m2} = 10^\circ\text{C}$.

Учесть теплоотдачу излучением со стороны воздуха.



Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) через кирпичную стенку дымо-
вой трубы в окружающую среду в ветряную погоду, а также температуры
на поверхностях трубы t_{c1} и t_{c2} .

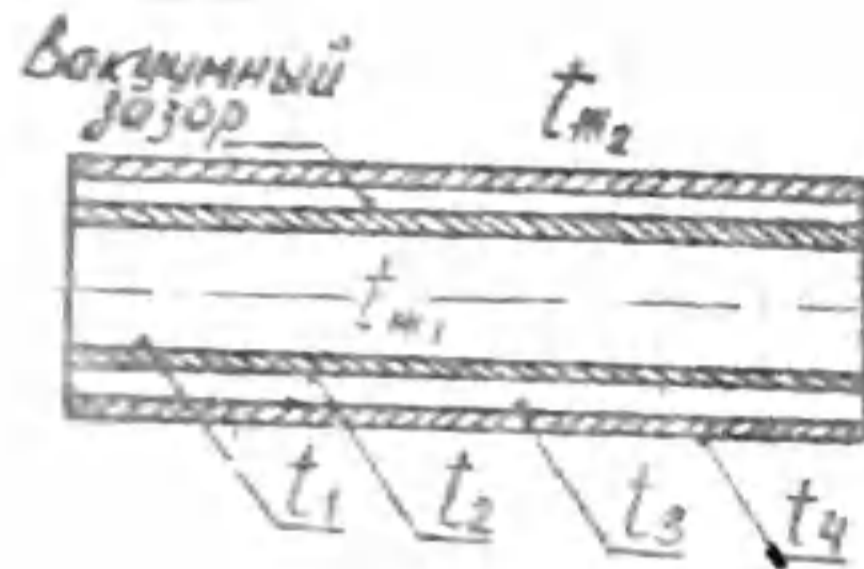
Дымовая труба: $d_2/d_1 = 1800/1500$ мм, $l = 30$ м, материал -
красный кирпич, $\lambda = 0,3$ Вт/м \cdot °С.

Дымовые газы: состав газов указан в справочных таблицах, $\bar{t}_r =$
 $= 260$ °С.

Воздух: $t_0 = 10$ °С, $w = 15$ м/с, направление ветра совпадает с
нормалью к боковой поверхности дымовой трубы.

Учесть теплообмен излучением внутри и снаружи трубы.

Задача № 2-34



Рассчитать теплопередачу (Q , Вт/м) через
двойную стальную вакууммированную стенку
трубы от трансформаторного масла внутри
трубы к наружному воздуху, а также тем-
пературы на поверхностях t_1, t_2, t_3, t_4 .
Горизонтальная труба с двойной стенкой:
поверхность стальная полированная, $d_2/d_1 =$
 $= 40/36$ мм, $d_4/d_3 = 50/46$ мм, $\lambda = 50$
Вт/м \cdot °С.

Трансформаторное масло: $\bar{t}_{m1} = 120$ °С, $w = 0,5$ м/с.

Воздух: $t_{m2} = 20$ °С.

Учесть теплоотдачу излучением со стороны воздуха.

Задача № 2-35

Трубы водоподогревателя расположены в газоходе и омываются
продольным потоком дымовых газов.

Определить теплопередачу всех труб (Q , Вт) от дымовых газов к
воде и температуры на внутренней (t_{c1}) и наружной (t_{c2}) поверх-
ностях трубы.

Трубы стальные шероховатые окисленные: $d_2/d_1 = 75/70$ мм, $\lambda =$
 $= 50$ Вт/м \cdot °С, $l = 1$ м, число труб $n = 9$.

Дымовые газы: $t_r = 600$ °С, $w_r = 18$ м/с, степень черноты газов
принять предельной.

Вода: $t_0 = 90$ °С, $w_0 = 0,8$ м/с.

Учесть теплообмен излучением поверхности труб с дымовыми газами.

Задача № 2-36

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) и температуры на поверхностях го-
ризонтальной пластины (t_{c1}) и (t_{c2}).

Нижняя поверхность пластины обдувается продольным потоком возду-
ха с $t_{m1} = 30$ °С, $w = 20$ м/с.

На верхней поверхности - спокойный воздух с $t_{m2} = 0$ °С.

Пластина стальная шлифованная толщиной $\delta = 4$ мм, длиной $l =$
 $= 3$ м, шириной $b = 1,5$ м, $\lambda = 50$ Вт/м \cdot °С.

Учесть теплоотдачу излучением на поверхностях пластины.

Задача № 2-37

Рассчитать теплопередачу (Q , Вт) через стенку трубы батареи
отопления с круглыми ребрами и температуру на наружной поверхности
трубы (t_{c2}). Теплообменом излучением пренебречь.

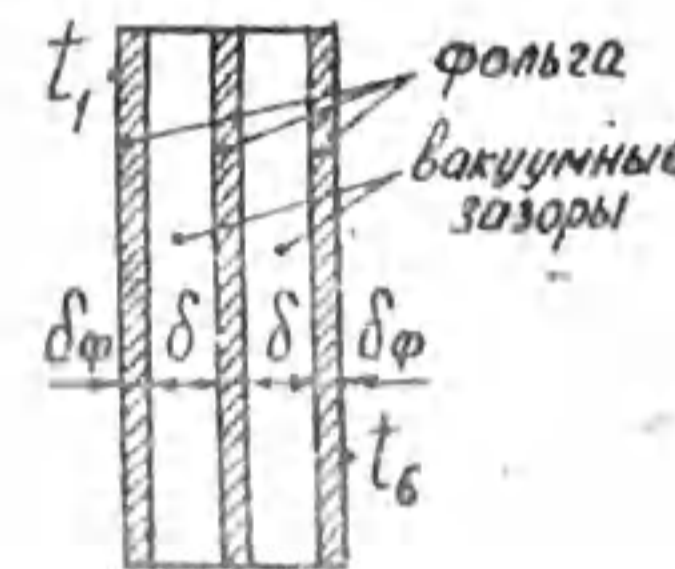
Оребренная труба: $d_2/d_1 = 76/70$ мм, длина трубы $l_{тр} = 2$ м,
диаметр ребер $D = 180$ мм, $\lambda = 50$ Вт/м \cdot °С, шаг ребер $u = 8$ мм,
толщина ребер $\delta_r = 1$ мм.

Горячая вода: $\bar{t}_{m1} = 70$ °С, $w = 0,5$ м/с.

Воздух: $t_{m2} = 15$ °С.

Сравнить полученный результат с теплопередачей через неоребрен-
ную трубу.

Задача № 2-38



Рассчитать теплопередачу (q , Вт/м 2)
через вакуумно-многослойную тепловую
изоляцию сушильного шкафа.

Дано: $t_1 = 200$ °С, $t_2 = 20$ °С, $\delta_f = 1$ мм,
 $\lambda_f = 230$ Вт/м \cdot °С, $\delta = 2$ мм, $\epsilon_v = 0,1$.

Рассчитать эффективный коэффициент теп-
лопроводности вакуумно-многослойной изо-
ляции, сравнить с теплопроводностью воз-
духа.

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ СМЫВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ВЫНУЖДЕННЫМ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

Задача № 3

Трубка с наружным диаметром $d = 15$ мм длиной l обтекается вынужденным потоком жидкости (см. таблицу 6) со скоростью w . Температура жидкости t_m . Температура наружной поверхности трубки $t_c = 80^\circ\text{C}$.

Определить средний коэффициент теплоотдачи и тепловой поток Q , Вт, для двух случаев:

- а) обтекание трубки продольным потоком жидкости;
- б) обтекание трубки поперечным потоком жидкости.

Сравнить полученные результаты и сделать выводы.

Таблица 6.

Номер варианта	Жидкость	$t_m, ^\circ\text{C}$	$l, \text{мм}$	$w, \text{м/с}$
1	МАСЛО МК	50	200	2,2
2		60	210	2,4
3		70	220	2,6
4		110	230	2,8
5		100	240	3,0
6		90	250	3,2
7		120	260	3,4
8	МАСЛО МС-20	60	270	3,6
9		70	280	3,8
10		100	290	4,0
11		110	300	3,8
12		120	200	3,6
13		20	210	3,4
14		30	220	3,2
15	ВОДА	30	230	3,0
16		40	240	2,8
17		10	250	2,6
18		90	260	2,4
19		70	270	2,2
20		20	280	2,0
21		50	290	2,2

Продолжение табл. 6

номер варианта	Жидкость	$t_m, ^\circ\text{C}$	$l, \text{мм}$	$w, \text{м/с}$
22	ТРАНСФОРМАТОРНОЕ МАСЛО	40	300	2,4
23		50	200	2,6
24		90	210	2,8
25		100	180	2,9
26		120	230	3,0
27		60	240	3,2
28		30	250	3,4
29	ВОЗДУХ	10	270	15
30		20	300	20

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ СТЕНКУ ТРУБЫ

Задача № 4

Горизонтальная труба горячей воды находится на открытом воздухе. Материал и теплопроводность (λ) трубы, диаметры (d_1, d_2), скорость и температура воды ($w; t_m$) приведены в таблице 7. Температура воздуха 20°C . Степень черноты поверхности трубы $\epsilon_c = 0,9$.

Рассчитать коэффициенты теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы (α_1), от наружной поверхности трубы к воздуху (α_2), теплотери с 1 м длины трубы ($Q, \text{Вт/м}$) и температуры на поверхностях трубы (t_{c1} и t_{c2}). Учесть теплообмен излучением.

Ответы выделить.

Таблица 7.

№вар.	материал трубы	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$w, \text{м/с}$	$t_m, ^\circ\text{C}$
1	СТАЛЬ	20	25	0,2	50
2		30	36	0,3	60
3	$\lambda = 45,4 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$	46	51	0,4	70
4		64	70	0,5	80
5		100	108	0,6	90
6	ЛАТУНЬ	20	25	0,6	90
7		30	36	0,5	90
8	$\lambda = 85,5 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$	46	51	0,4	70

№ вар.	Материал трубы	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$w, \text{м/с}$	$t_{\text{ж}}, \text{°C}$
9	ЛАТУНЬ, $\lambda = 85,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$	64	70	0,3	60
10		100	108	0,2	50
11		20	25	1,0	50
12	СТАЛЬ $\lambda = 45,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$	30	36	1,2	60
13		46	51	1,4	70
14		64	70	1,6	80
15		100	108	1,8	90
16	МЕДЬ $\lambda = 384 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$	20	25	0,25	90
17		30	36	0,35	80
18		46	51	0,45	70
19		64	70	0,55	60
20		100	108	0,65	50
21	СТАЛЬ $\lambda = 45,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$	20	25	0,05	50
22		30	36	0,04	60
23		46	51	0,03	70
24		64	70	0,02	80
25		100	108	0,01	90
26	ЛАТУНЬ $\lambda = 85,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$	20	25	1,1	50
27		30	36	1,2	60
28		46	51	1,3	70
29		64	70	1,4	80
30		100	108	1,5	90

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ

Задача № 5

В испарительных трубах ($d_1 = 38 \text{ мм}$, $d_2 = 40 \text{ мм}$, $\lambda = 45,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$) парогенератора кипящая вода при давлении p движется со скоростью w . Трубы омываются дымовыми газами. Средняя температура дымовых газов $t_r = 1600 \text{ °C}$, эквивалентный коэффициент теплоотдачи от газов к наружной поверхности труб α_r .

Рассчитать коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности труб к кипящей воде (α_1), тепловой поток ($Q, \text{Вт/м}$), передаваемый

через стенку трубы, температуры на внутренней (t_{c_1}) и наружной (t_{c_2}) поверхностях трубы. Исходные данные по вариантам приведены в табл. 8.

Таблица 8

№ вар.	$p, \text{бар}$	$w, \text{м/с}$	$\alpha_r, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$
1	33,48	0,3	37,46
2	39,78	0,4	23,45
3	46,94	0,5	75,93
4	55,05	0,6	52,57
5	64,19	0,7	93,58
6	74,45	0,8	63,9
7	85,92	0,9	59,35
8	98,7	0,45	54,51
9	112,9	0,65	49,29
10	128,65	0,35	43,5
11	33,48	0,25	37,46
12	39,78	0,55	101
13	46,94	0,65	98,67
14	55,05	0,75	72,18
15	64,19	0,5	47,83
16	74,45	0,4	63,87
17	85,92	0,55	59,35
18	98,7	0,65	54,51
19	112,9	0,7	49,29
20	128,65	0,8	43,5
21	33,48	0,2	67,8
22	39,78	0,3	110,9
23	46,94	0,4	75,93
24	55,05	0,5	52,57
25	64,19	0,6	100,2
26	74,45	0,7	102,4
27	85,92	0,75	59,35
28	98,7	0,65	54,51
29	112,9	0,8	49,29
30	128,65	0,85	43,5

Задача № 6

На наружной поверхности трубы диаметром d_2 и высотой l конденсируется сухой насыщенный водный пар при давлении P .

Труба стальная ($\lambda = 45,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$) с толщиной стенки $\delta = 1 \text{ мм}$.
Температура наружной поверхности трубы t_c .

Определить средний коэффициент теплоотдачи от пара к трубе, количество пара, которое конденсируется на поверхности трубы за 1 час, перепад температур по толщине стенки для двух случаев:

- а) труба вертикальная;
- б) труба горизонтальная.

Выделить ответы и сделать выводы. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 9.

Таблица 9.

№ вар.	$d_2, \text{ мм}$	$l, \text{ м}$	$P, \text{ бар}$	$t_c, \text{ °C}$
I	20	2,5	1,43	105
2	22	3,0	1,98	115
3	24	3,5	2,7	125
4	28	4,0	3,61	135
5	30	3,9	4,76	145
6	30	3,8	6,18	155
7	28	3,7	7,92	165
8	22	2,6	10,03	175
9	24	2,7	12,55	185
10	26	2,8	15,55	195
II	28	2,9	19,08	205
12	30	3,1	23,20	215
13	32	3,2	27,98	225
14	30	3,3	33,48	235
15	32	3,4	39,78	245
16	34	3,5	46,94	255
17	36	3,6	55,05	265
18	38	3,7	64,19	275
19	40	3,8	74,45	285
20	30	3,9	85,92	295
21	32	4,0	1,43	103
22	20	2,6	1,98	113

№ вар.	$d_2, \text{ мм}$	$l, \text{ м}$	$P, \text{ бар}$	$t_c, \text{ °C}$
23	22	2,7	2,7	123
24	24	2,8	3,61	133
25	26	2,9	4,76	143
26	28	3,0	6,18	153
27	30	3,1	7,92	163
28	32	3,2	10,03	173
29	34	3,3	12,55	183
30	36	3,4	15,55	193

Л и т е р а т у р а

1. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. - М.: Энергоиздат, 1981.
2. Теплотехника. Под ред. А.П.Баскакова. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.: "Энергия", 1977.
4. Краснощакоев Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. - М.: Энергия, 1980.
5. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник. Под общ. ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина. - М.: Энергоатомиздат, 1988.

Методические указания и задачи для самостоятельной работы студентов

Составитель Коновалова Лидия Степановна

Подписано к печати 04.02.94.
Формат 60x84/16. Бумага писчая № 2.
Плоская печать. Усл.п.л. 2,13. Уч.-изд.л. 2,47.
Тираж 150 экз. Заказ 92. Бесплатно.
Ротапринт ТГУ. 634004, Томск, пр.Ленина, 30.