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/м^2 – плотность теплового потока; $\partial t/\partial n$, ^{o}С/м – градиент температуры; F, м^2 – площадь изотермической поверхности; λ, Вт/м$\cdot^{o}$С – коэффициент теплопроводности; α, Вт/м$^2\cdot^{o}$С – коэффициент теплоотдачи; C_o, Вт/м$^2\cdot$К^4 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_к$ – коэффициент, учитывающий конвекцию в прослойке жидкости или газа; $(Gr\cdot Pr)_{m\delta}=\left(\frac{g\beta(t_1-t_2)\delta^3}{\nu^2}\cdot Pr\right)_m$ – произведение чисел Грасгофа и Прандтля; ε – степень черноты поверхности; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты; $\tilde{\varepsilon}_г$ – предельная степень черноты газа; $\tilde{\varepsilon}_{гс}$ – предельная степень черноты газа при температуре стенки; $\varepsilon_г$ – степень черноты газа; t_c – температура стенки, $t_ж$ – температура омывающей стенку среды.

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

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

конвективный теплообмен – законом Ньютона-Рихмана

$$Q=\alpha F(t_c-t_ж),\ Вт.$$

В основе расчета лучистого теплообмена лежит закон Стефана-Больцмана

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

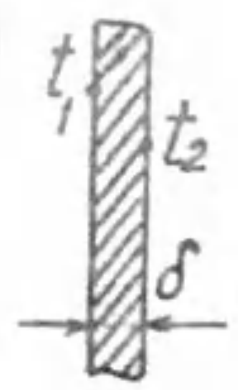
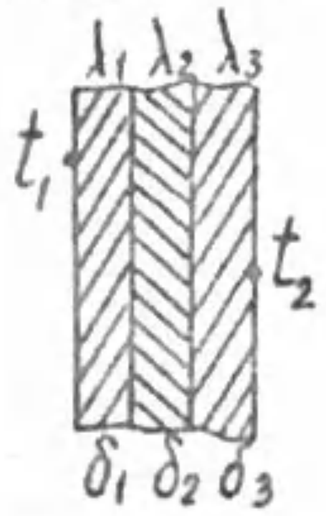
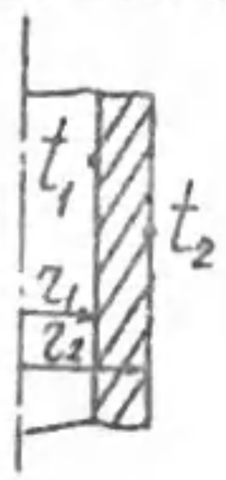
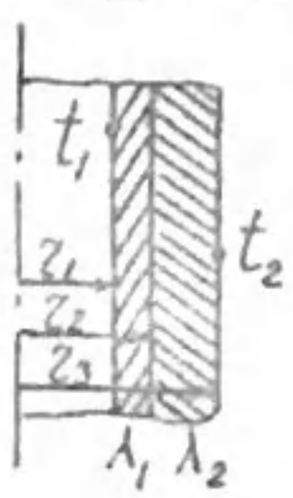
в общем случае

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

где R, ^{o}С/Вт – термическое сопротивление. Для твердых тел (стенок 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
ПЛОСКАЯ СТЕНКА		$R=\frac{\delta}{\lambda F}$
СОСТАВНАЯ ПЛОСКАЯ СТЕНКА		$R=\frac{\delta}{(\lambda_1+\lambda_2)F}$
МНОГОСЛОЙНАЯ ПЛОСКАЯ СТЕНКА		$R=\frac{\delta_1}{\lambda_1 F}+\frac{\delta_2}{\lambda_2 F}+\frac{\delta_3}{\lambda_3 F}, \quad R=\sum_{i=1}^{n} R_i.$
ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ СТЕНКА		$R=\frac{1}{2\pi\ell\lambda}\ln\frac{r_2}{r_1}.$
МНОГОСЛОЙНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ СТЕНКА		$R=\frac{1}{2\pi\ell\lambda_1}\ln\frac{r_2}{r_1}+\frac{1}{2\pi\ell\lambda_2}\ln\frac{r_3}{r_2},$ $R=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2\pi\ell\lambda_i}\ln\frac{r_{i+1}}{r_i}$

Для многослойной плоской стенки

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

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 ($\lambda_{экв}$).

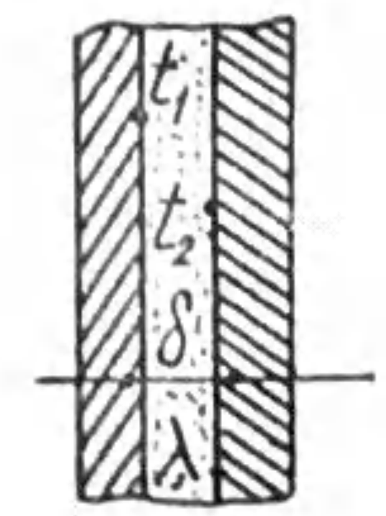


Рис. 1

Для прослоек жидкости с учетом конвективного теплообмена

$$\lambda_{экв}=\lambda\cdot\varepsilon_к.$$

При $(Gr\cdot Pr)_{m\delta}\le 10^3$

$$\varepsilon_к=1, \quad \lambda_{экв}=\lambda,$$

т.е. конвективным теплообменом можно пренебречь.

При $(Gr\cdot Pr)_{m\delta}>10^3$ $\quad \varepsilon_к=0{,}18(Gr\,Pr)_{m\delta}^{0,25}$

Для газовых прослоек с учетом конвективно-лучистого теплообмена

$$\lambda_{экв}=\lambda\varepsilon_к+\lambda_л.$$

Лучистая составляющая коэффициента теплопроводности для плоских прослоек

$$\lambda_л=\frac{q_л\cdot\delta}{t_1-t_2},$$

для цилиндрических

$$\lambda_л=\frac{Q_л\ln\frac{r_{i+1}}{r_i}}{2\pi\ell(t_1-t_2)}$$

Лучистый теплообмен через плоскую прослойку диатермичного газа рассчитывается по формулам

$$q_л=C_0\varepsilon_{пр}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right],\ \frac{Вт}{м^2},$$

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

через цилиндрическую прослойку диатермичного газа

$$Q_л = C_0 \varepsilon_{пр} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right], \text{Вт},$$

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

Термическое сопротивление теплоотдачи в случае конвективного теплообмена между поверхностью и средой

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

в случае лучисто-конвективного теплообмена

$$R = \frac{1}{\alpha_{экв} F},$$

где $\alpha_{экв} = \alpha + \alpha_л$.

Лучистая составляющая коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_л = \frac{q}{|t_c - t_ж|}.$$

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

$$q_л = C_0 \varepsilon_c \left[\left(\frac{T_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_ж}{100}\right)^4\right],$$

между поверхностью и излучающим газом

$$q_л = q_{г-с} = \frac{\varepsilon_c C_0 \left[\overset{\infty}{\varepsilon}_г \left(\frac{T_г}{100}\right)^4 - \overset{\infty}{\varepsilon}_{г-с} \left(\frac{T_c}{100}\right)^4\right]}{\frac{\overset{\infty}{\varepsilon}_г}{\varepsilon_г} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1}.$$

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

$$q_л = \varepsilon_{пр} C_0 \left[\left(\frac{T_г}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_c}{100}\right)^4\right],$$

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_г} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1}.$$

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

$$\lambda(t) = a \pm bt. \qquad (I)$$

При расчетах теплоты пользуются средним коэффициентом теплопроводности для данного интервала температур $(t_1 \div t_2)$

$$\lambda_{ср} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t)\,dt}{t_2 - t_1}. \qquad (2)$$

Совместное решение (I) и (2) дает расчетную формулу для вычисления $\lambda_{ср}$. Получите ее.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

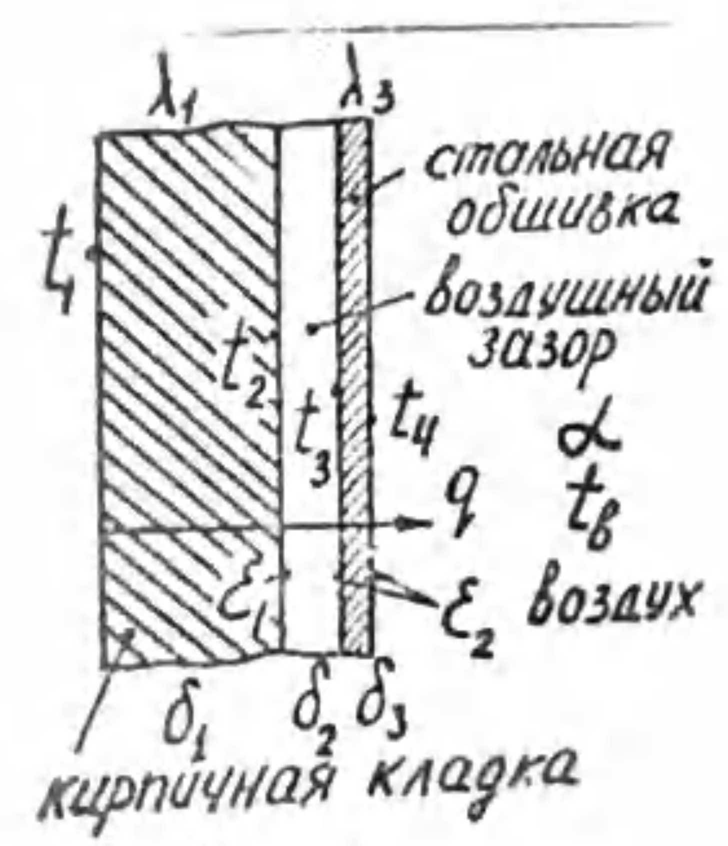


Рис. 2

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

Дано: $t_1 = 360^\circ$С, $t_в = 20^\circ$С, $\alpha = 12$ Вт/м$^2\cdot^\circ$С, $\delta_1 = 40$ см, $\delta_3 = 5$ 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°С.

Примечание: Конвективным теплообменом в воздушном зазоре пренебречь.

Решение

Теплота передается через трехслойную стенку к воздуху разными способами: через кирпичную кладку – теплопроводностью, $q = q_{T_1}$, через воздушный зазор – теплопроводностью и излучением, $q = q_{T_2} + q_{л_2}$, через стальную обшивку – теплопроводностью, $q = q_{T_3}$, от поверхности обшивки к окружающему воздуху – конвекцией и излучением $q = q_{к_4} + q_{л_4}$, т.е.

$$q = q_{T_1} = q_{T_2} + q_{л_2} = q_{T_3} = q_{к_4} + q_{л_4}.$$

В то же время

$$q = \frac{t_1 - t_в}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_{экв}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{экв}}}, \qquad (3)$$

$$q_{T_1} = \frac{t_1 - t_2}{\delta_1/\lambda_1}, \qquad (4)$$

$$q_{T_2} + q_{\Lambda_2} = \frac{t_2 - t_3}{\delta_2/\lambda_{экв}}, \qquad (5)$$

$$\lambda_{экв} = \lambda_в + \frac{q_{\Lambda_2}\,\delta_2}{t_2 - t_3}, \qquad (6)$$

$$q_{\Lambda_2} = C_0\,\varepsilon_{пр}\left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_3}{100}\right)^4\right], \qquad (7)$$

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \qquad (8)$$

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

$$q_{к_4} + q_{\Lambda_4} = \alpha_{экв}(t_4 - t_в), \qquad (10)$$

$$\alpha_{экв} = \alpha + \frac{q_{\Lambda_4}}{t_4 - t_в}, \qquad (11)$$

$$q_{\Lambda_4} = C_0\,\varepsilon_2\left[\left(\frac{T_4}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_в}{100}\right)^4\right]. \qquad (12)$$

Из приложения к [3] и [4]: степень черноты и коэффициент теплопроводности шамотного кирпича $\varepsilon_1 = 0,85$, $\lambda_1 = 0,84$ Вт/м·°С, стали (шероховатая, окисленная) – $\varepsilon_2 = 0,95$, $\lambda_3 = 45,4$ Вт/м·°С.

Согласно (I2),(II) и (I0), передаваемая теплота

$$q_{\Lambda_4} = 5,67\cdot 0,95\left[\left(\frac{50+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{20+273}{100}\right)^4\right] = 189,3\ \frac{Вт}{м^2},$$

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

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

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

$$t_2 = t_1 - \frac{q\,\delta_1}{\lambda_1} = 360 - \frac{544,3\cdot 0,4}{0,84} = 98,4\,°C,$$

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

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

По формулам (8) и (7) рассчитываются

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

$$q_{\Lambda_2} = 5,67\cdot 0,814\left[\left(\frac{98,4+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{50,1+273}{100}\right)^4\right] = 375,4\ \frac{Вт}{м^2}$$

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.

З А Д А Ч И

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Задача № I-I

Стеклянная витрина магазина имеет площадь I2 м^2 и толщину I см. Коэффициент теплопроводности стекла 0,8 Вт/м·°С. В холодный день температура наружной поверхности стекла составляет -I°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 I,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 $\lambda_{ст} = 19$ Вт/м·°С, асбеста $\lambda_{асб} = 0,7$ Вт/м·°С.

Задача № I-3

Распределение температуры по толщине плоской стенки с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 2$ Вт/м·°С 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 ($\lambda = 0,195$ Вт/м·°С) с температурой 30°С. Толщина пластины 1 см, площадь поверхности 2 м^2.

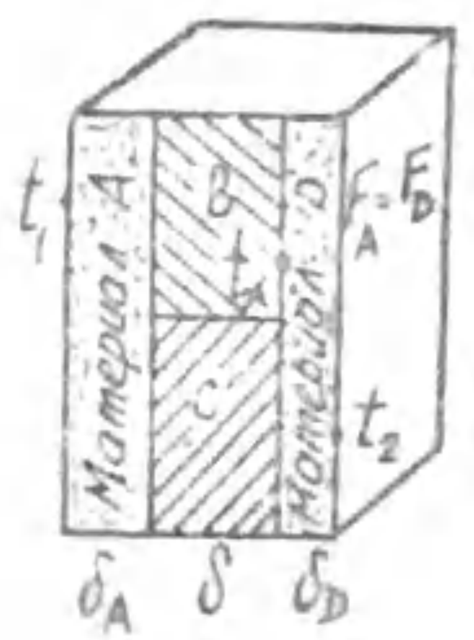
Найти температуру второй поверхности пластины и температуру ее среднего слоя. Чему равен градиент температуры?

Задача № I-5

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

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

Задача № I-6



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

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

Задача № I-7

Стена из силикатного кирпича ($\lambda = 0,82$ Вт/м·°С) толщиной 250 мм имеет с одной стороны температуру −30°С, а с другой +20°С.

Найти плотность теплового потока через стену.

На каком расстоянии от поверхности стены с отрицательной температурой находится изотермическая поверхность с $t = 0$°С?

Задача № I-8

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

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

Найти толщину слоя изоляции.

Задача № I-10

Печь изнутри выложена динасовым кирпичом ($\lambda = 0,35$ Вт/м·°С), за которым следует слой красного кирпича ($\lambda = 0,76$ Вт/м·°С) толщиной 250 мм и, наконец, снаружи – слой силикатного кирпича ($\lambda = 0,82$ Вт/м·°С) толщиной 60 мм. На внутренней поверхности печи температура 1150°С, на наружной 60°С.

Какова должна быть толщина слоя динасового кирпича, чтобы температура красного кирпича не превышала 820°С?

Задача № I-11

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

Определить температуру на наружной поверхности изоляции.

<u>Примечание</u>: Теплота, выделенная в электрических проводниках, рассчитывается по закону Джоуля-Ленца: $Q = I \cdot U$, Вт.

Задача № I-12

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

Диаметр провода 2 мм, электрическое сопротивление 1 м провода $= 3,28 \cdot 10^{-3}$ 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 неизолированной 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 (λ = 0,047 Вт/м·°C) толщиной 30 мм и сверху слоем совелита (λ = 0,09 Вт/м·°C) толщиной 40 мм. На наружной поверхности трубы температура -110°C, на поверхности совелита 10°C.

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°C. Его надо покрыть двумя слоями изоляции, причем температура наружной поверхности изоляции не должна превышать 50°C. Для изоляции предлагаются: слой А толщиной 20 мм и теплопроводностью $\lambda_А$ = 0,037 Вт/м·°C и слой Б толщиной 40 мм и теплопроводностью $\lambda_Б$ = 0,14 Вт/м·°C.

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 (λ = 1,04 Вт/м·°C), с d_2/d_1 = 26/20 мм. Общая длина труб 7 м. На внутренней поверхности труб температура 140°C.

Трубы спущены в раствор, температура кипения которого 125,6°C. Закипит ли раствор на поверхности труб?

Задача № I-17

Кварцевая труба (λ = 1,58 Вт/м·°C), 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°C, на наружной поверхности трубки 206°C; 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 (λ = 0,745 Вт/м·°C), 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·°C, плотность 1030 кг/м³. На внутренней поверхности трубы температура 74,5°C.

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

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

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

Задача № I-19

Бетонные трубы (λ = 1,28 Вт/м·°C), имеющие внутренний диаметр 150 мм и толщину стенки 25 мм, надо проложить в грунте. Температура грунта на внешней поверхности трубы может снизиться до -1,82°C. Жидкость в трубах замерзает при температуре -0,5°C. Можно ли прокладывать трубы без теплоизоляции, если потери теплоты с 1 м длины трубы 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°C, а на наружной поверхности изоляции 40°C. Коэффициент теплопроводности $\lambda_{из}$ = 0,15 Вт/м·°C. 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 (λ = 1,1 Вт/м·$^\circ$C) с d_2 = 800 мм и d_3 = 1300 мм должна быть футерована внутри огнеупорным кирпичом (λ = 0,5 Вт/м·$^\circ$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 превосходила 300°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.

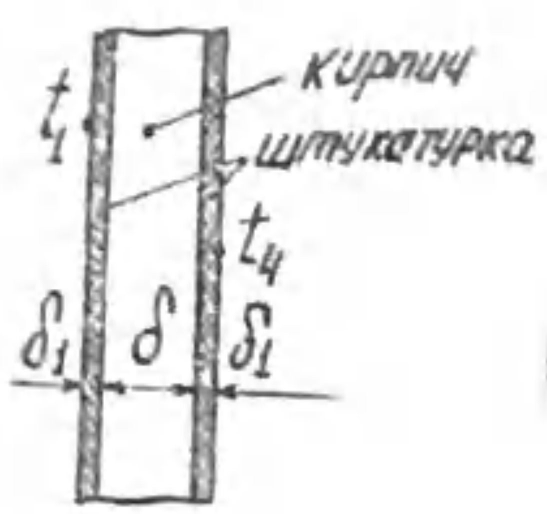
Пластина зажималась двумя плоскими поверхностями, температуры которых t_1 = 80°C, t_2 = 30°C.

Тепловой поток, передаваемый через пластину, замерялся, 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 мм ($\lambda_в$ = 0,025 Вт/м·$^\circ$C).

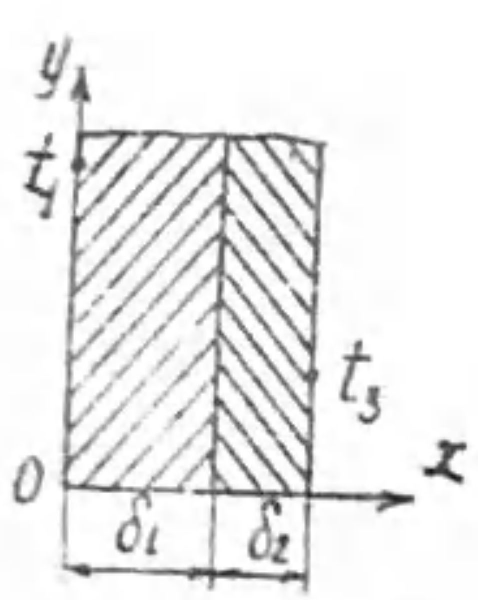
Задача № I-23



Дано: t_1 = 15°C, t_4 = −25°C, δ = 300 мм, λ = = 0,3 Вт/м·$^\circ$C, δ_1 = 15 мм, λ_1 = 0,7 Вт/м·$^\circ$C.

На каком расстоянии от поверхности стены с положительной температурой находится изотермическая поверхность с t = −5°C?

Задача № I-24



Дано: двухслойная тепловая изоляция: карболит, δ_1 = 60 мм, λ_1 = 0,231 Вт/м·$^\circ$C; резина, δ_2 = 30 мм, λ_2 = 0,16 Вт/м·$^\circ$C, t_1 = 100°C, t_3 = 30°C.

Найти координату изотермической поверхности с t = 50°C.

Рассчитать эффективный коэффициент теплопроводности двухслойной изоляции.

Задача № I-25

Рассчитать теплопотери с 1 м длины бетонной трубы с d_1 = 200 мм, d_2 = 220 мм, $\lambda_б$ = 1,28 Вт/м·$^\circ$C при условии, что перепад температуры по толщине стенки составляет 10°.

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

Задача № I-26

Трубопровод наружным диаметром d = 150 мм имеет трехслойную изоляцию с толщиной слоев δ_1 = 20 мм (λ_1 = 0,15 Вт/м·$^\circ$C), δ_2 = = 30 мм (λ_2 = 0,07 Вт/м·$^\circ$C), δ_3 = 2 мм (λ_3 = 0,14 Вт/м·$^\circ$C).

Рассчитать эффективный коэффициент теплопроводности трехслойной изоляции.

Задача № I-27

Теплопотери с 1 м длины стального трубопровода, покрытого однослойной изоляцией из войлока составляют 200 Вт. Внутренний и наружный диаметры трубопровода d_1 = 150 мм, d_2 = 156 мм, коэффициенты теплопроводности стали λ_c = 45,4 Вт/м·$^\circ$C, войлока $\lambda_в$ = 0,0524 Вт/м·$^\circ$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 мм, d_2 = 240 мм равны соответственно t_1 = 150°C, t_2 = 70°C. Коэффициент теплопроводности бетона λ = 1,28 Вт/м·$^\circ$C.

Каковы теплопотери 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 δ_1 = 8 мм (λ_1 = 45 Вт/м·$^\circ$C) покрыта двумя слоями тепловой изоляции: войлок строительный – δ_2 = = 20 мм (λ_2 = 0,05 Вт/м·$^\circ$C) и асбозонолит – δ_3 = 15 мм, λ_3 = 0,143+ +0,00019 t. Температура на поверхности двухслойной изоляции 30°C, максимальная температура асбозонолита 63,5°C.

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

Задача № I-30

Между стальной стенкой бака толщиной δ_1 = 8 мм (λ_1 = 45 Вт/м·°С) и облицовкой из текстолита толщиной δ_3 = 15 мм (λ_3 = 0,25 Вт/м·°С) находится теплоизолятор ньювель толщиной δ_2 = 20 мм (λ_2 = 0,087+ +0,000064 t). Температура на внутренней поверхности стальной стенки 200°С, максимальная температура текстолитовой плиты 67,8°С.

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

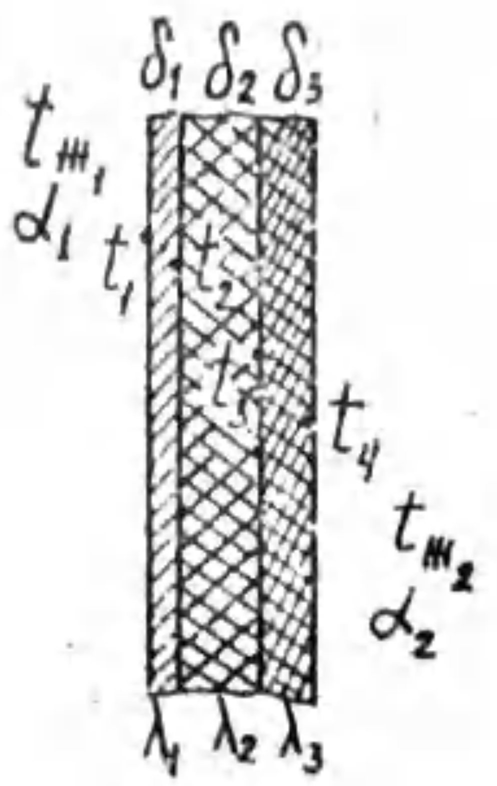
Задача № I-31

Две металлические пластины прижаты друг к другу шероховатыми поверхностями. Из-за неплотного контакта между ними образовалось термическое сопротивление $R = 10^{-2}$ °С·м²/Вт. Первая пластина толщиной 15 см имеет λ_1 = 45 Вт/м·°С, вторая, толщиной 25 см, имеет λ_2 = 70 Вт/м·°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, $Вт/м\cdot°С$; α, $Вт/м^2\cdot°С$.

Коэффициенты теплопроводности теплоизоляционных материалов даны в табл. 2.

$\lambda_{эф}$ – средний (эффективный) 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.

Таблица 2.

Теплоизоляцион. материал	λ, Вт/м·°С	Теплоизоляцион. материал	λ, Вт/м·°С
Асбест пушеный	0,13+0,00019 t	Минеральная вата	0,046
Асбозонолит	0,143+0,00019 t	Новоасбозурит	0,144+0,00014 t
Асбозурит	0,1622+0,000169 t	Ньювель	0,087+0,000064 t
Асбослюда	0,12+0,000148 t	Плексиглас	0,184
Асботермит	0,109+0,000145 t	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+0,000262 t	Совелит	0,0901+0,000087 t
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+0,000145 t

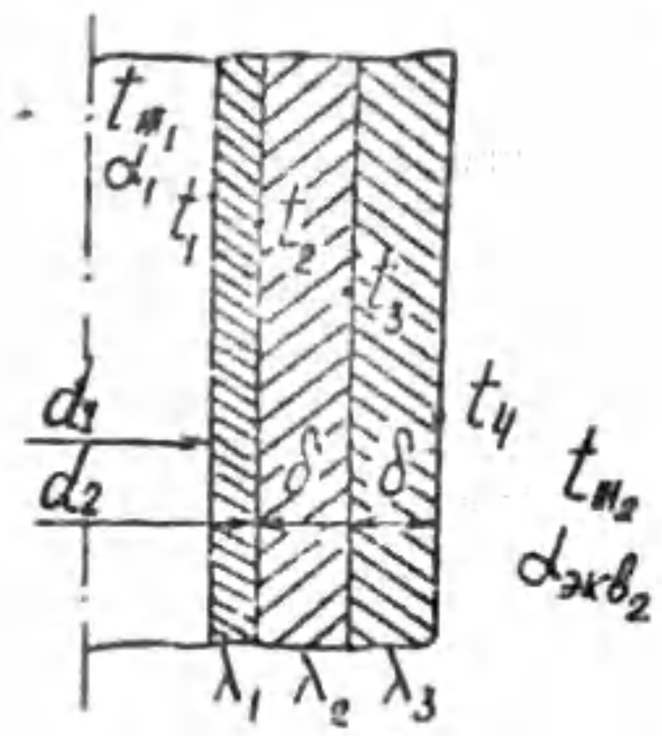
Таблица 3.

№ вар.	Исходные данные	Тепловая изоляция		Рассчитать
		δ_2	δ_3	
1	2	3	4	5
1	$t_{ж_1}$ = 280°С	Асбозурит	Картон	$\alpha_{2ж\delta}$, q, δ_3, t_1, t_2, t_3, $\lambda_{эф}$, $\delta_{ст}$
2	α_1 = 250	Асбест пушен.	Гипс	Учесть теплоотдачу излучением с поверхности
3	$t_{ж_2}$ = 20°С	Асботермит	Гипс	изоляции в окружающую
4	α_2 = 13,69	Зонолит	Слюда	среду (к воздуху). Сте-
5	t_4 = 50°С	Новоасбозурит	Карболит	пень черноты поверхности
6	δ_1 = 10 мм	Асбослюда	Слюда	изоляции принять $\varepsilon_{из}$ = 0,95
	δ_2 = 30 мм			
	λ_1 = 50			
7	t_1 = 200°С	Войлок строит.	Асбозонолит	q, t_2, t_3, $\lambda_{эф}$, $\delta_{ст}$
8	t_4 = 30°С	Ньювель	Текстолит	
9	δ_1 = 6 мм	Фибролит	Совелит	
10	δ_2 = 20 мм	Шлаковата	Вата	
11	δ_3 = 15 мм	Мин.вата	Новоасбозурит	
12	λ_1 = 45	Асбослюда	Карболит	

Продолжение табл. 3.

1	2	3	4	5
I3 I4 I5 I6 I7 I8	$t_1 = 800^{\circ}C$ $\lambda_1 = 30$ $t_{ж2} = 30^{\circ}C$ $\alpha_2 = 20$ $\delta_1 = \delta_2 = 10$ мм $\delta_3 = 10$ мм	Резина Фибролит Мин.вата Камышит Резина Фибролит	Пробк.плита Стекловата Прессшпан Плексиглас Войлок строит. Льнян.ткань	$\alpha_{2экв}, q, t_2, t_3, t_4, \lambda_{эф}, \delta_{ст}$. Учесть теплоотдачу излучением с поверхности изоляции в окружающую среду (к воздуху). Степень черноты поверхности изоляции принять $\varepsilon_{из} = 0{,}95$.
I9 20 2I 22 23 24	$t_{ж1} = 500^{\circ}C$ $\alpha_1 = 34{,}66$ $t_1 = 480^{\circ}C$ $t_4 = 60^{\circ}C$ $\delta_1 = 15$ мм $\delta_3 = 20$ мм $\lambda_1 = 40$	Асбест пуш. Плексиглас Асбозурит Картон Асботермит Фибролит	Камышит Зонолит Льнян.ткань Ньювель Резина Новоасбозурит	$\alpha_{1экв}, q, t_2, t_3, \delta_2, \lambda_{эф}, \delta_{ст}$ Учесть теплоотдачу излучением через слой диатермичного газа с $t_{ж1}$ к стальной стенке, имеющей степень черноты $\varepsilon_c = 0{,}45$.
25 26 27 28 29 30	$t_{ж1} = 450^{\circ}C$ $\alpha_1 = 17{,}1$ $t_1 = 430^{\circ}C$ $t_{ж2} = 20^{\circ}C$ $\alpha_2 = 13{,}04$ $\delta_1 = 5$ мм $\delta_2 = 30$ мм $\lambda_1 = 20$	Асбест пуш. Картон ..сбослюда Текстолит Совелит Фибролит	Войлок стр. Асбозурит Резина Шлаковата Прессшпан Асботермит	$\alpha_{1экв}, \alpha_{2экв}, q, t_2, t_3, t_4, \delta_3, \lambda_{эф}, \delta_{ст}$. Учесть теплоотдачу излучением на наружных поверхностях трехслойной стенки. Степень черноты поверхности изоляции принять $\varepsilon_{из} = 0{,}95$, для стальной стенки $\varepsilon_c = 0{,}4$

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБ



Задача № 3

По стальному трубопроводу ($\lambda_1 = 50$ Вт/м °С), 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: $\alpha, \frac{Вт}{м^2\,°C}$, $\lambda, \frac{Вт}{м\,°C}$, $t, °C$, d, мм, δ, мм.

Величины, которые требуется рассчитать, указаны в таблице 5.

Таблица 4.

№ вар.	Исходные данные	d_1	d_2	λ_2	λ_3
I	$\alpha_1 = 480$ $t_{ж1} = 502{,}5$ $\alpha_{экв2} = 10$ $t_{ж2} = 15$ $t_4 = 60$	I03	I09	0,204	0,0904
2	$\alpha_1 = 500$ $t_{ж1} = 516{,}9$ $t_3 = 332$ $\alpha_{экв2} = 10$ $t_{ж2} = 20$	I53	I59	0,204	0,090
3	$t_1 = 540{,}05$ $t_4 = 60$ $\alpha_1 = 520$ $\alpha_{экв2} = 10$ $t_{ж2} = 30$	I69	I75	0,242	0,094I
4	$t_2 = 547{,}7$ $t_3 = 368$ $t_{ж1} = 549{,}3$ $\alpha_2 = 3{,}57$ $\delta = 70$	2I3	2I9	0,240	0,0933
5	$t_1 = 510{,}03$ $t_4 = 60$ $\alpha_{экв2} = 10$ $t_{ж2} = 35$ $\alpha_1 = 560$	239	245	0,I8I	0,0875
6	$t_2 = 540$ $t_4 = 60$ $\alpha_1 = 580$ $t_{ж1} = 541{,}3$ $t_{ж2} = 30$	267	273	0,I82	0,I64
7	$\alpha_1 = 600$ $t_{ж1} = 501{,}3$ $t_2 = 500$ $t_4 = 60$ $\alpha_{экв2} = 10$	239	245	0,I78	0,I63
8	$t_4 = 60$ $\alpha_{экв2} = 10$ $t_{ж2} = 15$ $t_2 = 450$ $t_{ж1} = 451{,}7$	2I3	2I9	0,I20	0,I58
9	$\alpha_1 = 500$ $t_{ж1} = 401{,}8$ $t_1 = 400{,}05$ $t_4 = 60$ $\alpha_{экв2} = 10$	I69	I75	0,II6	0,I55

Продолжение табл. 4

№ вар.	Исходные данные	d_1	d_2	λ_2	λ_3
I0	t_2 = 500 t_4 = 60 α_1 = 520 α_2 = 3,72 δ = 29,5	I53	I59	0,I26	0,052
II	t_3 = 334,I t_4 = 60 t_2 = 520 $t_{ж1}$ = 52I,3 $t_{ж2}$ = 35	I03	I09	0,I28	0,052
I2	t_2 = 497,I α_1 = 560 $t_{ж1}$ =498,4 α_2 = 3,57 δ = 40	I53	I59	0,I79	0,052
I3	α_1 = 580 $t_{ж1}$ = 54I,2 t_4 = 60 α_2 = 3,42 δ = 5I	I69	I75	0,I87	0,052
I4	t_4 = 60 α_2 = 4,0 t_1 =5I5,05 α_1 = 600 δ = 3I,5	2I3	2I9	0,I83	0,052
I5	t_1 = 540,05 t_3 = 262 $\alpha_{экв_2}$= I0 $t_{ж2}$ = 25 α_1 = 480	239	245	0,I74	0,I58
I6	t_2 = 500 t_4 = 60 t_1 =500,05 α_1 = 500 $\alpha_{экв_2}$ = I0	267	273	0,I66	0,I57
I7	t_3 = I87 t_1 =430,04 $\alpha_{экв_2}$=I0 $t_{ж2}$ = 20 $t_{ж1}$ = 43I,4	239	245	0,I08	0,I57
I8	t_1 = 40I,73 $t_{ж1}$ = 402,8 α_1 =540 t_4 = 60 $t_{ж2}$ = 30	2I3	2I9	0,I06	0,I55
I9	t_1 =5I0,046 t_2 = 5I0 t_3=226,6 $t_{ж1}$ = 5II,4 $t_{ж2}$ = 35	I69	I75	0,I66	0,I6I
20	t_2 = 5I0 t_3 = 3I5 t_4 = 60 α_1 = 580 $\alpha_{экв_2}$ = I0	I53	I59	0,I7I	0,089
2I	t_4 = 60 t_3 = 279 α_1 = 600 $\alpha_{экв_2}$= I0 $t_{ж2}$ = 35	I03	I09	0,I68	0,0883
22	α_2 = 3,57 α_1 = 480 t_1 =480,05 t_3 = 296 δ = 50	I53	I59	0,I67	0,0875
23	t_2 = 540 t_3 = 327 t_4 = 60 $t_{ж1}$ = 54I,6 $t_{ж2}$ = 30	I69	I75	0,I70	0,0875
24	$t_{ж1}$= 52I,7 $t_{ж2}$ = I5 $\alpha_{экв_2}$=I0 t_1 = 520,05 t_3 = 338	2I3	2I9	0,I79	0,086I

Продолжение табл. 4

№ вар.	Исходные данные	d_1	d_2	λ_2	λ_3
25	$t_{ж1}$ = 440,7 $t_{ж2}$ = I0 α_1 = 5I0 t_1 = 438,57 t_4 = 60	204	2I0	0,230	0,I64
26	t_1 = 5I0,03 t_4 = 60 α_1 = 530 $\alpha_{экв_2}$ = I0 $t_{ж2}$ = 35	I84	I90	0,237	0,052
27	α_1 = 550 α_2 = 3,57 δ = 42 t_2 = 450 t_3 = 259	I74	I80	0,I22	0,0854
28	t_2 = 500 t_4 = 60 α_1 = 570 $t_{ж1}$ = 50I,6 $t_{ж2}$ = 20	I54	I60	0,I23	0,I60
29	$t_{ж1}$ = 502,5 t_1 = 500,07 t_4 =60 $\alpha_{экв_2}$ = I0 $t_{ж2}$ = I5	I03	I09	0,204	0,0904
30	α_1 = 500 α_2 = 3,72 t_1 = 5I5,05 t_3 = 332 δ =52,5	I53	I59	0,204	0,090

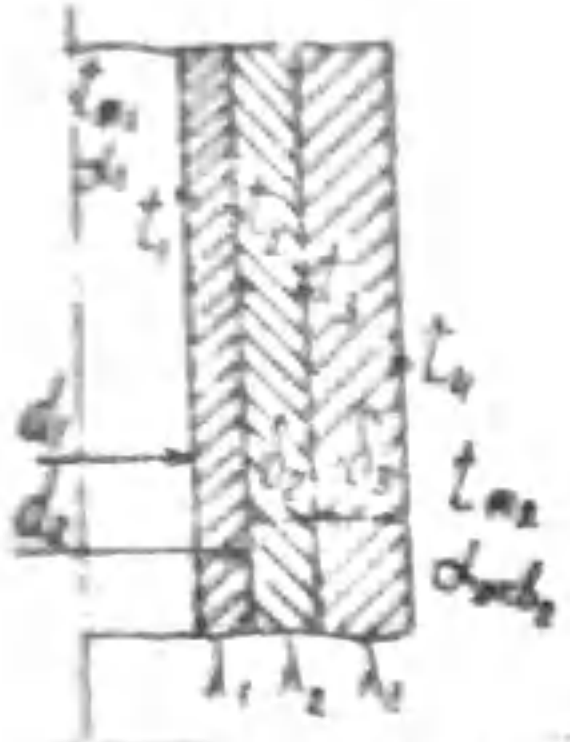
Таблица 5

α_1	$t_{ж1}$	t_1	t_2	t_3	t_4	$\alpha_{экв_2}$	$t_{ж2}$	$\alpha_л$	δ	Q
$\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	°C	°C	°C	°C	°C	$\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	°C	$\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	мм	$\frac{Вт}{м}$

В таблице 5 обведите кружком величины, данные в условии Вашего варианта задачи, например, для варианта I: α_1, $t_{ж1}$, $\alpha_{экв_2}$, $t_{ж2}$, t_4.

$\alpha_л$ - лучистая составляющая теплоотдачи с поверхности теплоизолированного трубопровода. При расчетах $\alpha_л$ принять степень черноты поверхности изоляции ε_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 $t_{ж_1} = 90^{\circ}C$, коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = 350$ Вт/м$^2 \cdot {}^{\circ}C$. Внутренний и наружный диаметры трубопровода $d_1 = 260$ мм, $d_2 = 268$ мм, коэффициент теплопроводности стали $\lambda_1 = 50$ Вт/м$\cdot{}^{\circ}C$.

Дополнительные исходные данные по вариантам приведены в таблице 6 в размерностях: δ, мм, t, °C, $\alpha_{экв_2}$, Вт/м$^2\cdot$°C, λ, Вт/м$\cdot$°C.

Рассчитать наружный диаметр теплоизолированного трубопровода и теплопотери в окружающую среду с I м длины трубы (Q, Вт/м).

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

Ответы выделить.

Таблица 6.

№ вар.	Дополнительные исходные данные
I	$\delta_2 = 36$ $t_4 = I6,2$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,204$ $\lambda_3 = 0,0904$
2	$\delta_3 = 52$ $t_3 = 69,I$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,242$ $\lambda_3 = 0,09$
3	$t_2 = 89,475$ $\delta_2 = 5I$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,304$ $\lambda_3 = 0,094I$
4	$t_4 = 2I,9$ $\delta_3 = 49$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,24$ $\lambda_3 = 0,I83$
5	$t_1 = 89,62$ $\delta_2 = 48$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $t_{ж_2} = I0$ $\lambda_2 = 0,38I$ $\lambda_3 = 0,0875$
6	$t_3 = 49,5$ $\delta_3 = 65$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $t_{ж_2} = I0$ $\lambda_2 = 0,I78$ $\lambda_3 = 0,I64$
7	$t_2 = 89,274$ $\delta_3 = 3I$ $t_4 = 22,5$ $\lambda_2 = 0,I82$ $\lambda_3 = 0,463$

Продолжение табл. 6

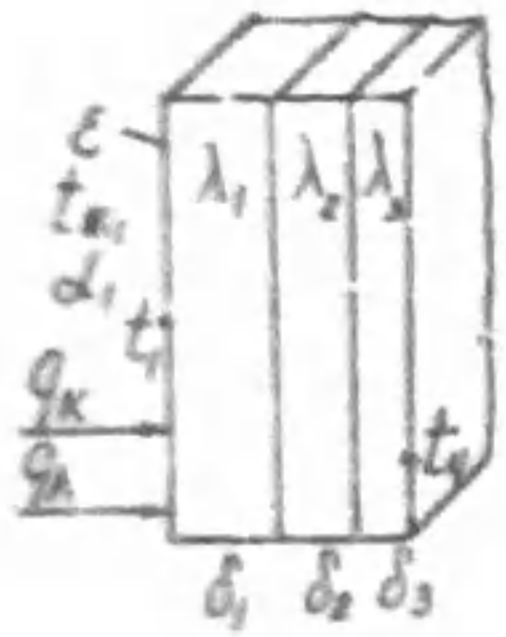
№ вар.	Дополнительные исходные данные
8	$t_3 = 45,4$ $\delta_2 = 55$ $t_4 = 20,8$ $\lambda_2 = 0,22$ $\lambda_3 = 0,I58$
9	$t_3 = 39$ $\delta_3 = 57$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,II6$ $\lambda_3 = 0,255$
I0	$t_4 = I8,I$ $\delta_3 = 4I$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,226$ $\lambda_3 = 0,082$
II	$t_3 = 64,2$ $\delta_2 = 32$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,228$ $\lambda_3 = 0,I82$
I2	$t_3 = 53,5$ $t_4 = I8,4$ $\delta_2 = 63$ $\lambda_2 = 0,279$ $\lambda_3 = 0,20$
I3	$t_3 = 58,5$ $\delta_2 = 54$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,287$ $\lambda_3 = 0,II$
I4	$t_3 = 72,0$ $\delta_3 = 52$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,283$ $\lambda_3 = 0,073$
I5	$t_4 = 20,8$ $\delta_2 = 37$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,374$ $\lambda_3 = 0,I58$
I6	$t_4 = 22,8$ $\delta_3 = 33$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $t_{ж_2} = I0$ $\lambda_2 = 0,266$ $\lambda_3 = 0,I57$
I7	$t_1 = 89,29$ $\delta_2 = 33$ $t_4 = 23,0$ $\lambda_2 = 0,508$ $\lambda_3 = 0,I32$
I8 ✓	$t_2 = 89,553$ $\delta_2 = 53$ $t_4 = I7,4$ $\lambda_2 = 0,I06$ $\lambda_3 = 0,355$
I9	$t_3 = 40,8$ $\delta_2 = 52$ $t_4 = I8,9$ $\lambda_2 = 0,I66$ $\lambda_3 = 0,26I$
20	$t_1 = 89,606$ $\delta_3 = 54$ $t_4 = I6,0$ $\lambda_2 = 0,27I$ $\lambda_3 = 0,089$
2I	$t_2 = 89,422$ $\delta_3 = 29$ $t_4 = I9,65$ $\lambda_2 = 0,268$ $\lambda_3 = 0,I$
22	$t_3 = 65,6$ $\delta_3 = 63$ $t_4 = I8,6$ $\lambda_2 = 0,267$ $\lambda_3 = 0,I6$
23	$t_1 = 89,206$ $\delta_2 = 57$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,370$ $\lambda_3 = 0,I8$
24	$t_2 = 89,623$ $\delta_2 = 60$ $t_{ж_2} = I0$ $\alpha_{экв_2} = I2$ $\lambda_2 = 0,I79$ $\lambda_3 = 0,0875$

Продолжение табл. 6

№ вар.	Дополнительные исходные данные
25	$t_3 = 58{,}5$ $\delta_2 = 65$ $t_{ж_2} = 10$ $\alpha_{жв_2} = 12$ $\lambda_2 = 0{,}33$ $\lambda_3 = 0{,}0861$
26	$t_1 = 16{,}6$ $\delta_2 = 64$ $t_{ж_2} = 10$ $\alpha_{жв_2} = 12$ $\lambda_2 = 0{,}237$ $\lambda_3 = 0{,}072$
27	$t_1 = 09{,}585$ $\delta_3 = 48$ $\alpha_{жв_2} = 12$ $t_{ж_2} = 10$ $\lambda_2 = 0{,}222$ $\lambda_3 = 0{,}095$
28	$t_1 = 89{,}376$ $\delta_3 = 42$ $\alpha_{жв_2} = 12$ $t_{ж_2} = 10$ $\lambda_2 = 0{,}223$ $\lambda_3 = 0{,}16$
29	$t_3 = 31{,}1$ $\delta_3 = 25$ $\alpha_{жв_2} = 12$ $t_{ж_2} = 10$ $\lambda_2 = 0{,}156$ $\lambda_3 = 0{,}4$
30	$t_4 = 19{,}6$ $\delta_3 = 29$ $\alpha_{жв_2} = 12$ $t_{ж_2} = 10$ $\lambda_2 = 0{,}28$ $\lambda_3 = 0{,}095$

РАСЧЕТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Задача № 5-1



Дано: $t_{ж_1} = 70°C$, $\alpha_1 = 60$ Вт/м$^2\cdot°C$, $\varepsilon = 0{,}6$, $t_1 = 50°C$, $\lambda_1 = 200$ Вт/м$\cdot°C$, $\lambda_3 = 30$ Вт/м$\cdot°C$, $t_4 = 0°C$, $\delta_1 = 30$ см, $\delta_2 = 25$ см, $\delta_3 = 15$ 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 Вт/м $°C$. Температура поверхности под изоляцией $500°C$, на поверхности изоляции $50°C$.

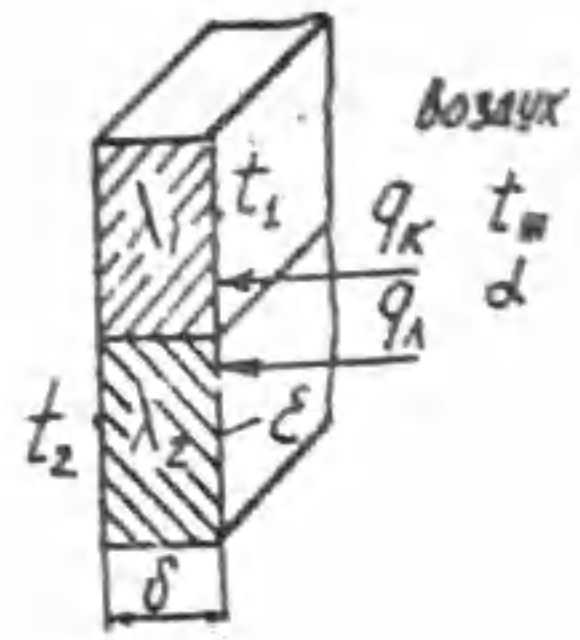
Поверхность изоляции омывается жидкостью с температурой $20°C$.

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: $\lambda_1 = 56$ Вт/м$\cdot°C$, $\lambda_2 = 52$ Вт/м$°C$, $t_ж = 150°C$, $\alpha = 5$ Вт/м$^2\cdot°C$, $t_2 = 20°C$, $\delta = 40$ см, $\varepsilon = 0{,}9$.

Рассчитать температуру поверхности t_1, конвективный ($q_к$) и лучистый ($q_л$) потоки теплоты.

Задача № 5-4

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

Какова температура поверхности трубки? Как изменится температура поверхности, если в результате длительного пользования на поверхности трубки образуется накипь толщиной $\delta_н = 0{,}5$ мм, $\lambda_н = 0{,}8$ Вт/м$\cdot°C$?

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

Задача № 5-5

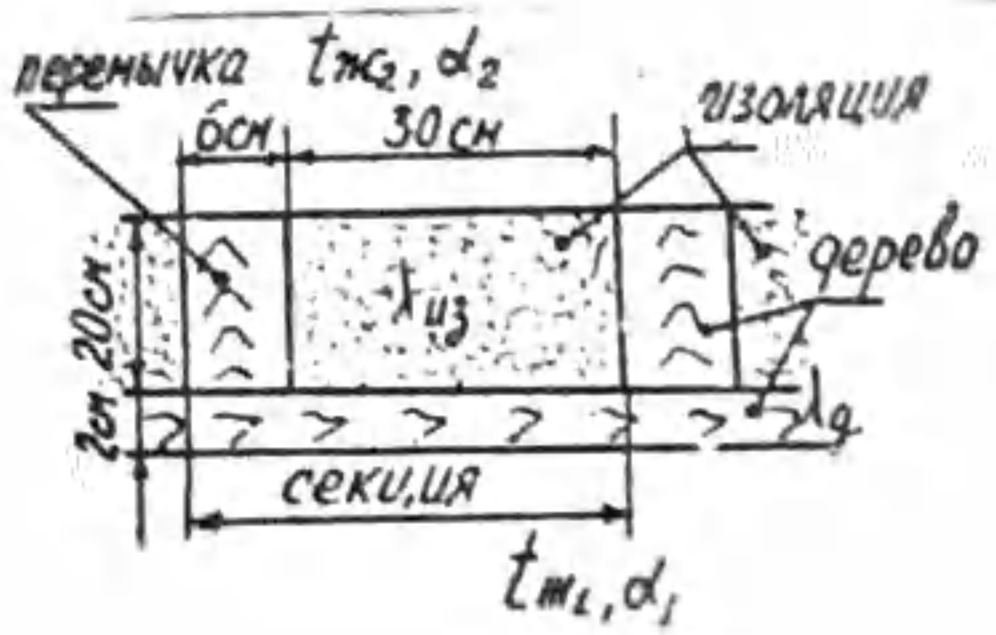
Воздух с температурой $20°C$ омывает верхнюю поверхность горизонтальной плиты из железа ($\lambda = 50$ Вт/м$\cdot°C$) толщиной 10 см. Коэффициент конвективной теплоотдачи между поверхностью и воздухом составляет 20 Вт/м$^2\cdot°C$. К этой же поверхности подводится лучистый тепловой поток 350 Вт/м^2. 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 ($\lambda = 0{,}16$ Вт/м $°C$), 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 Вт/м$^2\cdot°C$.

Задача № 5-7



На рисунке показано сечение потолка сельского жилого дома.

Дано: $\lambda_{из} = 0{,}05$ Вт/м·°С, $\lambda_д = 0{,}15$ Вт/м·°С, $t_{ж1} = 20^\circ$С, $t_{ж2} = -20^\circ$С, $\alpha_1 = 10$ Вт/м^2·°С, $\alpha_2 = 20$ Вт/м^2·°С.

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

Задача № 5-8

Паропровод из титана ($\lambda = 15$ Вт/м·°С) диаметром 57х64 мм и длиной $\ell = 50$ м имеет на внутренней поверхности температуру 160°С. Теплота в окружающую среду с температурой 25°С от наружной поверхности трубопровода передается конвекцией и излучением. Степень черноты поверхности трубы $\varepsilon = 0{,}9$, коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha = 10$ Вт/м^2·°С.

Рассчитать теплопотери трубопровода и перепад температур по толщине стенки трубы.

Задача № 5-9

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

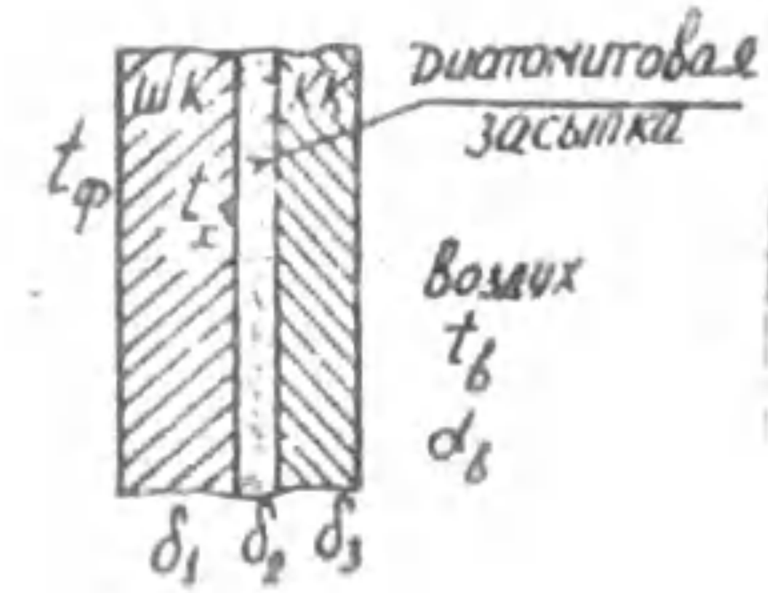
Температура на наружной поверхности стальной обшивки 30°С.

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 теплопотери через 1 м^2 поверхности и перепад температур в стальной обшивке.

Задача № 5-10

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



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 $\delta_1 = 125$ мм ($\lambda_1 = 0{,}28$ Вт/м °С) и слоя красного кирпича толщиной $\delta_2 = 500$ мм ($\lambda_2 = 0{,}7$ Вт/м·°С). Температура на поверхности кирпича со стороны воздуха в помещении цеха равна 75°С. Температура воздуха 25°С, коэффициент теплоотдачи от поверхности кирпича к воздуху 10 Вт/м^2·°С, степень черноты поверхности кирпича 0,9.

Рассчитать теплопотери с 1 м^2 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°С покрывается слоем изоляции толщиной 80 мм и теплопроводностью $\lambda = 0{,}14+0{,}00016\,t$ Вт/м·°С. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 20$ Вт/м^2·°С, температура окружающей среды $t_ж = 25^\circ$С.

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

Задача № 5-13

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

Какова температура на поверхности изоляции?

Задача № 5-14

Оголенный электропровод диаметром 2 мм имеет на поверхности температуру 90°С и коэффициент теплоотдачи α = 22 Вт/м^2·°С. Температура окружающего воздуха 18°С. Когда провод покрыли резиновой изоляцией ($\lambda_{из}$ = 0,16 Вт/м·°С) толщиной 3 мм, коэффициент теплоотдачи уменьшился в 2 раза. Какая температура будет теперь на поверхности провода? На поверхности изоляции? Электрическая мощность осталась неизменной.

Задача № 5-15

Стальной трубопровод диаметром 200х216 мм с коэффициентом теплопроводности λ = 40 Вт/м·°С проложен на открытом воздухе, температура которого равна -17°С. По трубе передается горячая вода со средней температурой 90°С. Коэффициент теплоотдачи от воды к трубе α_1 = 800 Вт/м^2·°С. Теплота от трубы к воздуху передается излучением и конвекцией. Длина трубопровода 23 м, коэффициент теплоотдачи от трубы к воздуху α_2 = 9 Вт/м^2·°С, степень черноты поверхности трубы ε = = 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 (λ = 40 Вт/м·°С) диаметром 58х65 мм, длиной ℓ = 120 м со скоростью 1,2 м/с. Температура воды на входе в трубу 90°С, на выходе из трубы 88°С. Коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности трубы α_1 = 2000 Вт/м^2·°С. Теплоемкость воды c = 4,18 кДж/кг·°С. Труба теплоизолирована, толщина тепловой изоляции $\delta_{из}$ = 21 мм, температура окружающего воздуха 2°С, коэффициент теплоотдачи α_2 = 35 Вт/м^2·°С. Теплота от поверхности изоляции ($\varepsilon_{из}$ = 0,9) передается конвекцией и излучением.

Рассчитать:

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

Задача № 5-17

Паропровод из титана (λ = 15 Вт/м·°С) диаметром 57х64 мм и длиной 50 м имеет температуру внутренней поверхности 160°С. Его необходимо теплоизолировать. При этом суточная потеря теплоты не должна превышать 941 мДж. Теплоизоляционный материал - вермикулит (λ = = 0,33 Вт/м·°С). Температура окружающего воздуха 25°С. Теплота с поверхности изоляции передается излучением и конвекцией. Коэффициент конвективной теплоотдачи α = 10 Вт/м^2·°С, степень черноты вермикулита ε = 0,9.

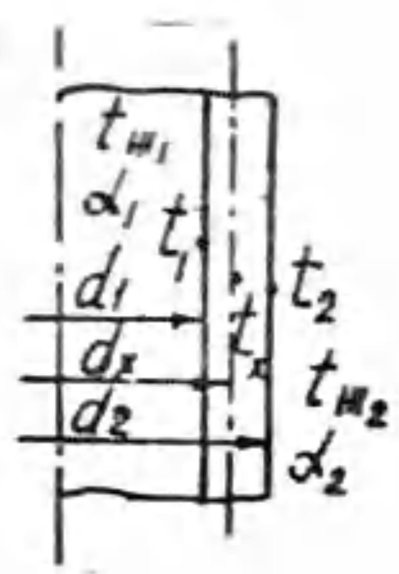
Рассчитать толщину слоя изоляции и температуру на наружной поверхности изоляции.

Задача № 5-18

В установке для тепловой переработки нефти нефтепродукты передаются по титановой трубе (λ = 15 Вт/м·°С) диаметром 118х126 мм со средней температурой 350°С, коэффициент теплоотдачи α_1 = 300 Вт/м^2·°С. Снаружи труба обогревается излучением от ленточных нагревателей и конвекцией от газов, имеющих среднюю температуру 1400°С. Коэффициент конвективной теплоотдачи к наружной поверхности трубы α_2 = = 100 Вт/м^2·°С, степень черноты поверхности ε = 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 (λ = 50 Вт/м·°С) длиной ℓ = 2,5 м за 1 час, а также температуры на поверхностях трубы и в слое с d_x = 80 мм.

Дано: $t_{ж1}$ = 800°С, α_1 = 35 Вт/м^2·°С, $t_{ж2}$ = 20°С, α_2 = 6 Вт/м^2·°С, d_1 = 50 мм, d_2 = 110 мм.

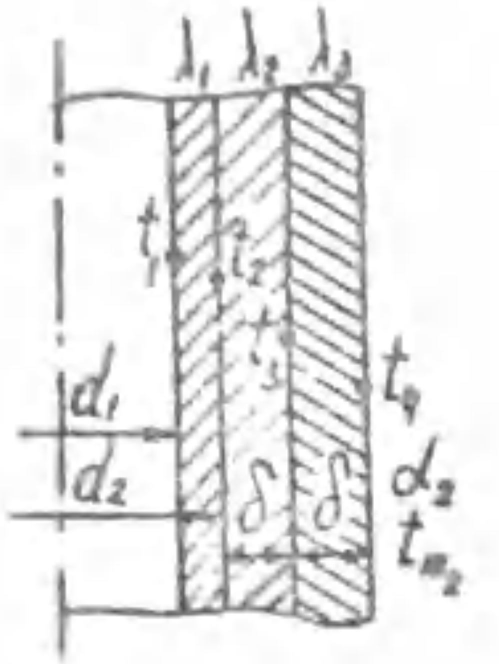
Задача № 5-20

По теплоизолированному стальному (λ = 50 Вт/м·°С) паропроводу передается насыщенный пар с температурой 235°С. Внутренний и наружный диаметры трубы d_1 = 100 мм, d_2 = 108 мм, толщина тепловой изоляции $\delta_{из}$ = 80 мм ($\lambda_{из}$ = 0,06 Вт/м·°С), степень черноты поверхности изоляции ε = 0,9.

Теплота с поверхности теплоизолированной трубы к окружающему воздуху с $t_ж$ = 25°С передается излучением и конвекцией. Коэффициенты конвективной теплоотдачи от пара к поверхности 465 Вт/м^2·°С, от поверхности изоляции к воздуху 6 Вт/м^2·°С.

Рассчитать теплопотери Q , Вт/м, температуру на наружной поверхности изоляции, максимальную температуру слоя изоляции.

Задача № 5-21

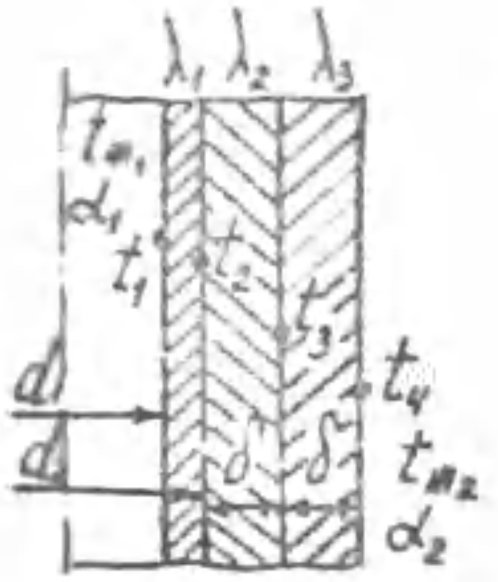


Стальной трубопровод (λ = 50 Вт/м·°С) имеет два слоя тепловой изоляции одинаковой толщины δ.

Дано: d_1 = 154 мм, d_2 = 160 мм, λ_2 = 0,123 Вт/м·°С, $t_{ж_1}$ = 501,6°С, α_1 = 570 Вт/м^2·°С, $t_{ж_2}$ = 20°С, t_2 = 500°С, t_4 = 60°С, λ_3=0,16 $\frac{Вт}{м\cdot°С}$.

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

Задача № 5-22

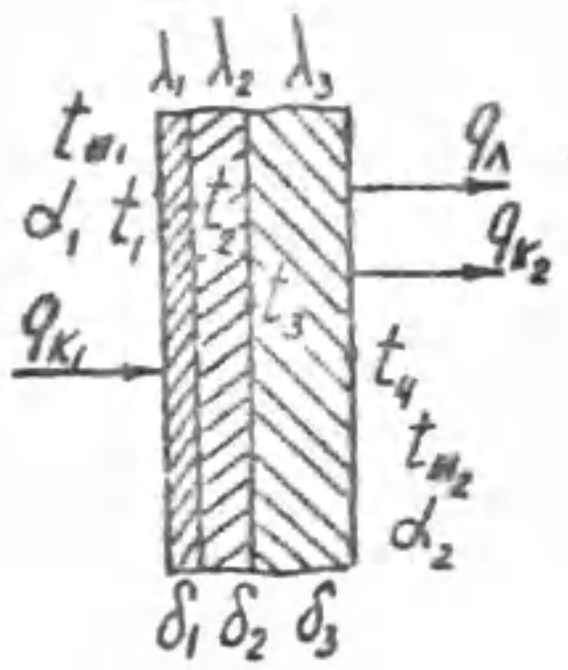


Стальной трубопровод (λ_1 = 50 Вт/м·°С) имеет два слоя тепловой изоляции одинаковой толщины δ.

Дано: d_1 = 184 мм, d_2 = 190 мм, t_1 = = 510,03°С, t_4 = 60°С, α_1 = 530 Вт/м^2·°С, α_2 = = 10 Вт/м^2·°С, $t_{ж_2}$ = 35°С, λ_2 = 0,237 Вт/м·°С, λ_3 = 0,052 Вт/м·°С.

Рассчитать: $Q, \frac{Вт}{м}, \delta, t_{ж_1}, t_2, t_3$.

Задача № 5-23



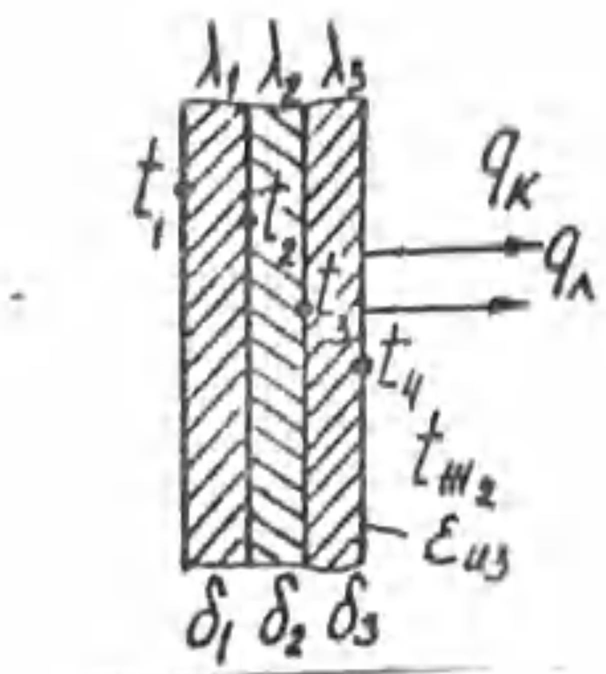
Стальная стенка толщиной δ_1 покрыта двумя слоями тепловой изоляции толщиной δ_2 и δ_3.

Дано: $t_{ж_1}$ = 280°С, α_1 = 250 Вт/м^2·°С, $t_{ж_2}$= 20°С, α_2 = 13,69 Вт/м^2·°С, t_4 = 50°С, δ_1 = 10 мм, λ_1 = 50 Вт/м·°С, δ_2 = 30 мм, $\varepsilon_{из}$= 0,95, λ_2 = 0,2 Вт/м·°С, λ_3 = 0,1622+ +0,000169 t , Вт/м·°С.

Рассчитать: $\alpha_{экв_2}, q, \delta_3, t_1, t_2, t_3$, 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.

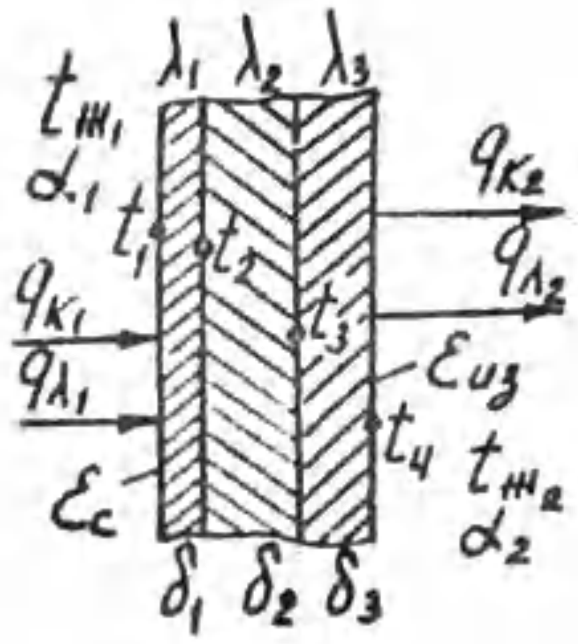


Дано: t_1 = 800°С, λ_1 = 30 Вт/м·°С, $\varepsilon_{из}$ = 0,95, $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$ = 10 мм, t_3 = = 637,4°С, $t_{ж_2}$ = 30°С, λ_2 = 0,144+0,00014t, Вт/м·°С, λ_3 = 0,07 Вт/м·°С.

Рассчитать: $q, t_2, t_4, q_л, q_к$, 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.

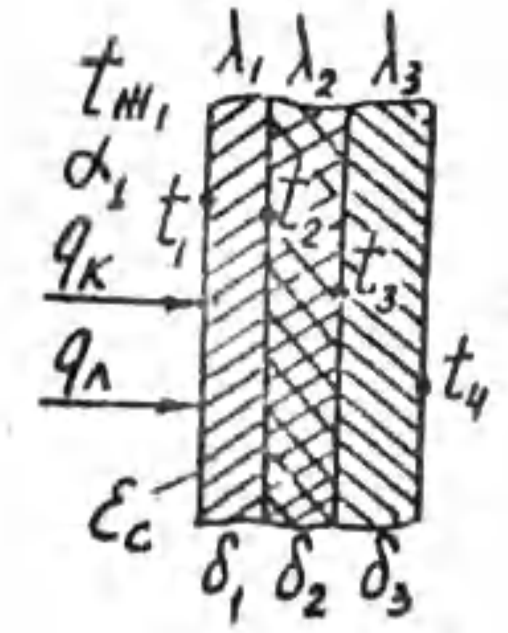


Дано: $t_{ж_1}$ = 450°С, α_1 = 17,1 Вт/м^2·°С, t_1= 430°С, $t_{ж_2}$ = 20°С, α_2 = 13,04 Вт/м^2·°С, δ_1 = 5 мм, δ_2= 30 мм, λ_1 = 20 Вт/м·°С, λ_2 = 0,13 Вт/м·°С, ε_c = 0,4, λ_3 = 0,06+ +0,000145t, Вт/м·°С, $\varepsilon_{из}$= 0,95.

Рассчитать: $\alpha_{экв_1}, q, t_2, t_3, t_4, \delta_3, \alpha_{экв_2}$.

Задача № 5-26

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



Дано: $t_{ж_1}$ = 500°С, α_1 = 34,66 Вт/м^2·°С, t_3 = 380°С, t_4 = 60°С, δ_1 = 15 мм, λ_1 = 40 Вт/м·°С, δ_3 = 20 мм, λ_2 = 0,16 Вт/м·°С, λ_3 = 0,06+0,000145t, Вт/м·°С, ε_c = 0,45.

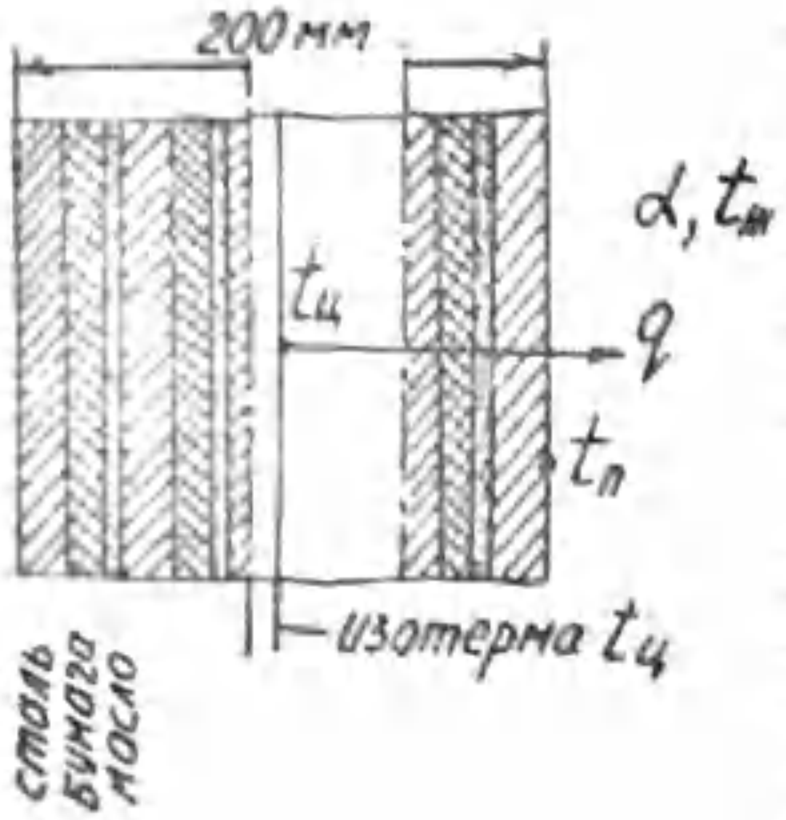
Рассчитать: $\alpha_{экв_1}, q, t_1, t_2, \delta_2$, эффективную теплопроводность двухслойной изоляции $\lambda_{эф}$.

Задача № 5-27

Прямоугольный провод трансформатора имеет пропитанную бумажную изоляцию. Плотность теплового потока через изоляцию q = 500 Вт/м^2 Толщина изоляции δ = 0,4 мм, λ = 0,16 Вт/м·°С, ε = 0,93.

Коэффициент конвективной теплоотдачи от бумажной изоляции α = = 14 Вт/м$^2\cdot{}^\circ$С. Температура окружающего воздуха $t_ж$ = 20°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 δ_1 = 0,35 мм, λ_1 = 20 Вт/м$\cdot{}^\circ$С, между которыми находится бумажная изоляция толщиной δ_2 = 20 мк, λ_2 = 0,15 Вт/м$\cdot{}^\circ$С. Пакет шириной 200 мм погружен в трансформаторное масло с $t_ж$ = 40°С, α = 158 Вт/м$^2\cdot{}^\circ$С.

Не смотря на то, что пакет спрессован под большим давлением, между бумажной изоляцией и смежным стальным листом имеется тонкая пленка масла толщиной δ_3 = 1 мк, λ_3 = 0,1 Вт/м$\cdot{}^\circ$С. Температура в центре пакета $t_ц$ = 120°С.

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

Задача № 5-29

Стенка трансформатора толщиной δ = 3 мм, λ = 60 Вт/м$\cdot{}^\circ$С с одной стороны соприкасается с трансформаторным маслом (α_1 = 90 Вт/м$^2\cdot{}^\circ$С, $t_{ж_1}$ = 95°С), с другой стороны охлаждается воздухом (α_2 = 13 Вт/м$^2\cdot{}^\circ$С, $t_{ж_2}$ = 20°С). Степень черноты поверхности стенки ε = 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 см, имеет удельное электрическое сопротивление $\rho = \frac{1}{1,3}, \frac{Ом\cdot мм^2}{м}$. По проводнику проходит постоянный ток J = 227 А.

Проводник опрессован гетинаксовым цилиндром радиусом r_2 = 2 см, λ = 0,2 Вт/м$\cdot{}^\circ$С.

Чему равен перепад температуры по толщине гетинаксовой трубки?

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

Литература

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.Блэк. 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 95 . Бесплатно.
Ротапринт ТПУ. 634004, Томск, пр. Ленина, 30.

Методические указания и задачи для самостоятельной работы по курсу "[illegible]" для студентов теплотехнических специальностей. - [illegible] изд. ТПИ, 1984 - [illegible] с.

Составитель Коновалова Л.С.

Рецензент доц. к.т.н. [illegible] А.В.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры теоретической и общей теплотехники 24 июня [illegible] года.

Зав. кафедрой Ю.А.Загромов

ТЕПЛООТДАЧА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

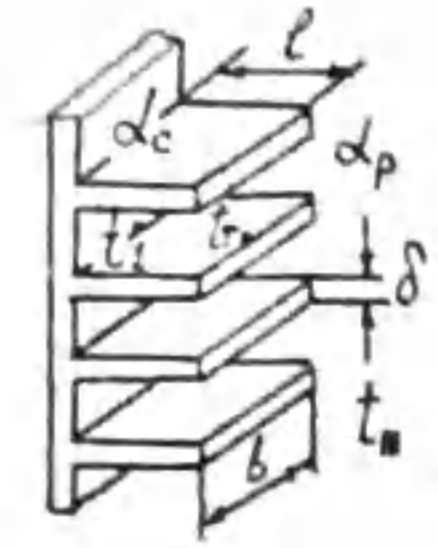


Рис. 1

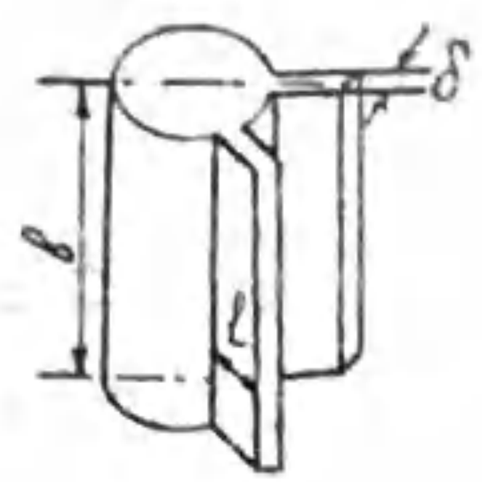


Рис. 2

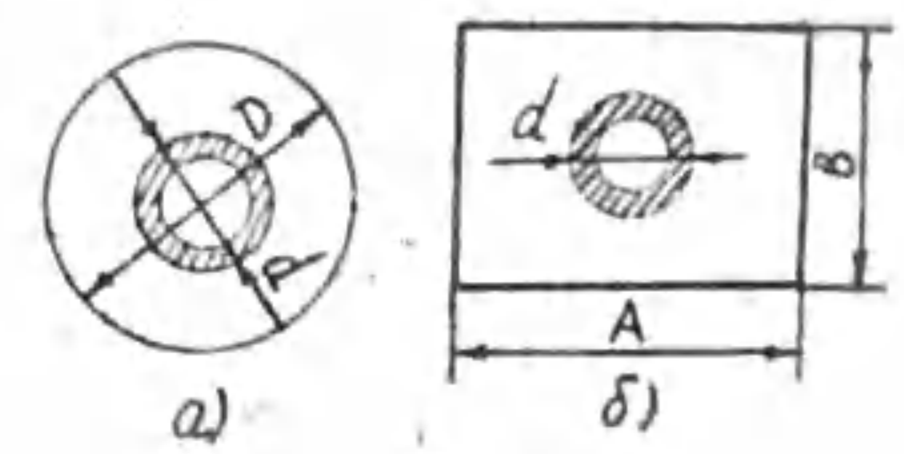


Рис. 3

Условные обозначения: l, b, δ – соответственно длина, ширина и толщина ребра, Р – 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, $\vartheta_1 = t_1 - t_ж$ – перегрев основания ребра, $\vartheta_T = t_T - t_ж$ – 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

$$Q = nQ_p + Q_c, \tag{I}$$

$$Q_c = \alpha_c F_c \vartheta_1 . \tag{2}$$

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

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

или

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

$$\left.\begin{aligned} &\text{где}\quad E=\frac{th(ml)}{ml}, \quad m=\sqrt{\frac{\alpha_p P}{\lambda f}}, \quad f=\delta l. \\ &\text{При}\quad P\approx 2\delta \qquad m=\sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda\delta}}. \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Перегрев торца ребра

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

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

$$\left.\begin{aligned} &Q_p=\alpha_p F_p \vartheta_1 E, \quad E=\frac{th(ml)}{ml}, \quad m=\sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda\delta}}, \\ &l'=\frac{D-d}{2}\left(1+0{,}35\ln\frac{D}{d}\right), \quad \vartheta_T=\frac{\vartheta_1}{ch(ml')}. \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

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

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

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

Теплопередача

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

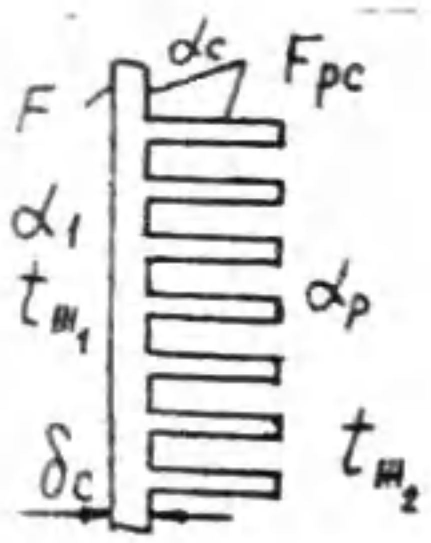


Рис. 4

$$Q=\frac{t_{ж_1}-t_{ж_2}}{\frac{1}{\alpha_1 F}+\frac{\delta_c}{\lambda F}+\frac{1}{\alpha_{пр}F_{pc}}},$$

через оребренную стенку трубы

$$Q=\frac{t_{ж_1}-t_{ж_2}}{\frac{1}{\alpha_1 F_1}+\frac{1}{2\pi l\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{\alpha_{пр}F_{pc}}},$$

где $\alpha_{пр}=\alpha_p\left(\frac{nF_p}{F_{pc}}E\psi+\frac{F_c}{F_{pc}}\right)$ – приведенный коэффициент теплоотдачи, ψ = 0.85 – коэффициент, учитывающий неравномерность температуры по длине ребра.

З А Д А Ч И

Задача № I-I

Труба с поперечными ребрами омывается продуктами сгорания топлива. Наружный диаметр трубы d = 80 мм, длина трубы $l_{тр}$ = 4 м, толщина ребер δ_p = 5 мм, количество ребер n = 200. Температура наружной поверхности трубы t_c = 200°C, средняя температура продуктов сгорания $t_ж$ = 480°C, коэффициенты теплоотдачи от ребер α_p = = 30 Вт/м^2.°C, от межреберной поверхности α_c = 40 Вт/м^2.°C.

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 °C	Форма и размеры ребер
I	Чугун	63	Круглые, D = 200 мм
2	Сталь	45.4	Прямоугольные AxB=200xI50 мм
3	Латунь	85.5	Квадратные, A=I80 мм
4	Медь	384	Круглые, D = I50 мм
5	Алюминий	204	Прямоугольные AxB=210xI70 мм

Задача № I-2

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

Температура поверхности цилиндра t_c = 260°C, температура воздушного потока $t_ж$ = 20°C, средний коэффициент теплоотдачи от ребер к воздуху α_p = 50 Вт/м^2.°C.

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·°С	Форма и размеры ребер
I	Чугун	63	Круглые D = 220 мм
2	Сталь	45.4	Прямоугольные АхВ=220х200 мм
3	Латунь	85.5	Квадратные, A = 220 мм
4	Медь	384	Круглые D = 240 мм
5	Алюминий	204	Прямоугольные АхВ=230х210 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 I.5хI.5 $м^2$, число прямых ребер постоянной толщины n = 90, толщина ребер δ_p = 3 мм. Температура у основания ребер t_1 = 60°С, температура окружающего воздуха $t_ж$ = I5°С, коэффициенты теплоотдачи от ребер α_p = 6.2 Вт/$м^2$·°С, от межреберной поверхности α_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·°С	ℓ, мм
I	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 = I200 мм, наружный диаметр трубы d = 60 мм, длина ребер ℓ = 85 мм, число ребер n = I2, толщина ребра $\delta_p = \frac{1}{24}\pi d$. Температура у основания ребер t_1 = 85°С, температура воздуха $t_ж$ = 25°С, коэффициенты теплоотдачи от ребер и межреберной поверхности $\alpha_p = \alpha_c$ = I0 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	I	2	3	4	5
Материал оребренной трубы	Чугун	Сталь	Латунь	Медь	Алюминий
λ, Вт/м·°С	63	45,4	85,5	384	204

Задача № I-5

Рассчитать теплопередачу Q, Вт для участка оребренной трубы водяного экономайзера длиной $\ell_{тр}$ = 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 δ_p = 2 мм, шаг ребер u = 7 мм.

Вода: $\bar{t}_{ж_1}$ = 60°С, α_1 = 5313 Вт/$м^2$·°С.

Дымовые газы: $t_{ж_2}$ = 430°С, $\alpha_p = \alpha_c$ = 74,7 Вт/$м^2$·°С.

Таблица 5.

Номер варианта	Материал оребренной трубы	λ Вт/м·°С	Форма и размеры ребер
I	Чугун	63	Круглые D = 50 мм
2	Сталь	45,4	Прямоугольные АхВ=50х40 мм
3	Латунь	85,5	Квадратные А=50 мм
4	Медь	384	Круглые D = 40 мм
5	Алюминий	204	Прямоугольные АхВ=45х30 мм

Задача № I-6

Рассчитать теплопередачу Q, Вт для участка оребренной трубы длиной $\ell_{тр}$ = 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 толщины δ_p = I мм, шаг ребер u = 5 мм.

Вода: $t_{ж_1}$ = 80°C, α_1 = 1733 Вт/м$^2\cdot$°C.

Воздух: $t_{ж_2}$ = 20°C, $\alpha_p = \alpha_c$ = 90,36 Вт/м$^2\cdot$°C.

Таблица 6.

Номер варианта	Материал оребренной трубы	λ Вт/м.°C	Форма и размеры ребер
I	Чугун	63	Круглые D = 40 мм
2	Сталь	45,4	Прямоугольные АхВ=40х30 мм
3	Латунь	85,5	Квадратные А=35 мм
4	Медь	384	Круглые D = 35 мм
5	Алюминий	204	Прямоугольные АхВ=35х30 мм

СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТЕЛ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

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

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

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

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

Пластина при симметричных условиях охлаждения

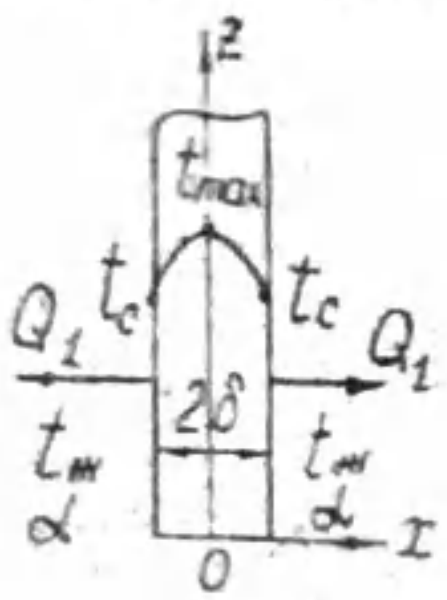


Рис. 5

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

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

Математическая постановка задачи:

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

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

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

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

$$Q = 2Q_1 = q_v \cdot V, \ Вт$$

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

Пластина с несимметричными условиями охлаждения

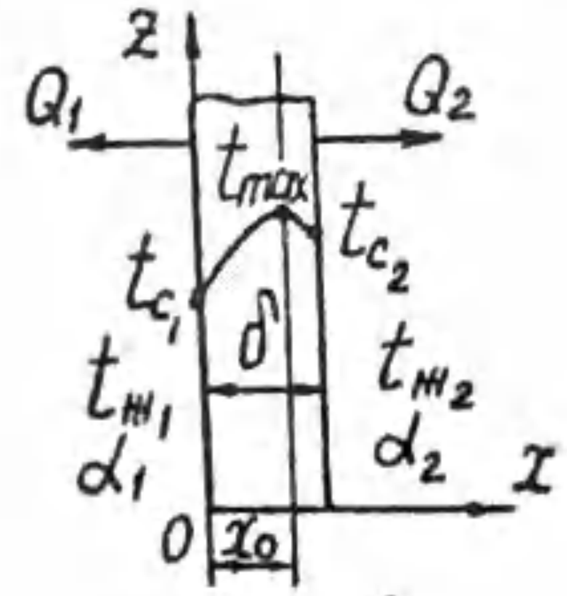


Рис. 6

Дано: $\delta, \lambda, q_v, t_{ж_1}, \alpha_1, t_{ж_2}, \alpha_2$.

Найти: $t = f(x)$, Q_1, Q_2, x_0.

Математическая постановка задачи:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \\ &-\lambda\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=\delta} = \alpha_2\,(t_{c_2} - t_{ж_2}), \\ &\lambda\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=0} = \alpha_1\,(t_{c_1} - t_{ж_1}), \\ &\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=x_0} = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

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

$$\left.\begin{aligned} &t = t_{ж_1} - \frac{q_v}{2\lambda}x^2 + \left(x + \frac{\lambda}{\alpha_1}\right)M, \\ &M = \frac{\frac{q_v\delta}{\alpha_2} + \frac{q_v\delta^2}{2\lambda} + (t_{ж_2} - t_{ж_1})}{\frac{\lambda}{\alpha_2} + \delta + \frac{\lambda}{\alpha_1}}, \\ &x_0 = \frac{\lambda}{q_v}M. \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

Теплота, рассеиваемая поверхностями пластины,

$$Q_1 = q_v V_1, \ Вт$$

$$Q_2 = q_v V_2, \ Вт$$

$$V_1 + V_2 = V, \ м^3.$$

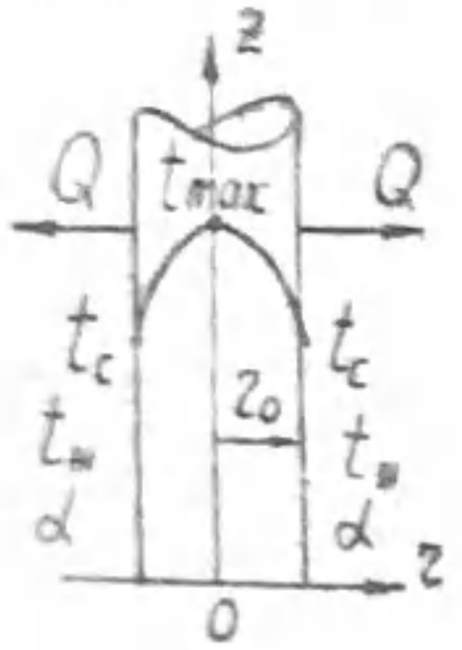
Используя (9), запишите формулы для расчета $t_{c_1}, t_{c_2}, t_{max}$.

Решите самостоятельно задачу о пластине с внутренними источниками тепла при несимметричных условиях охлаждения и граничных условиях I рода:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \\ &\text{при } x = 0 \quad t = t_{c_1}, \\ &\text{при } x = \delta \quad t = t_{c_2}, \\ &\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=x_0} = 0 \end{aligned}\right. \qquad (I0)$$

и получите уравнение температурного поля $t=f(x)$, формулы для расчета $x_0,\ t_{max},\ t_{max}-t_{c_1},\ t_{max}-t_{c_2}$.

Цилиндрический стержень



Дано: $r_0,\ \lambda,\ q_v,\ \alpha,\ t_ж$.

Найти: $t=f(r)$, Q, Вт.

Математическая постановка задачи:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt}{dr} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \\ &\left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=0} = 0, \\ &-\lambda\left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=r_0} = \alpha(t_c - t_ж) \end{aligned}\right. \qquad (II)$$

Решением системы уравнений (II) является уравнение температурного поля $t=f(r)$:

$$t = t_ж + \frac{q_v r_0}{2\alpha} + \frac{q_v}{4\lambda}(r_0^2 - r^2) \qquad (I2)$$

Используя (I2), запишите формулы для расчета $t_{max}, t_c, t_{max}-t_c$.

Тепловой поток, рассеиваемый поверхностью стержня,

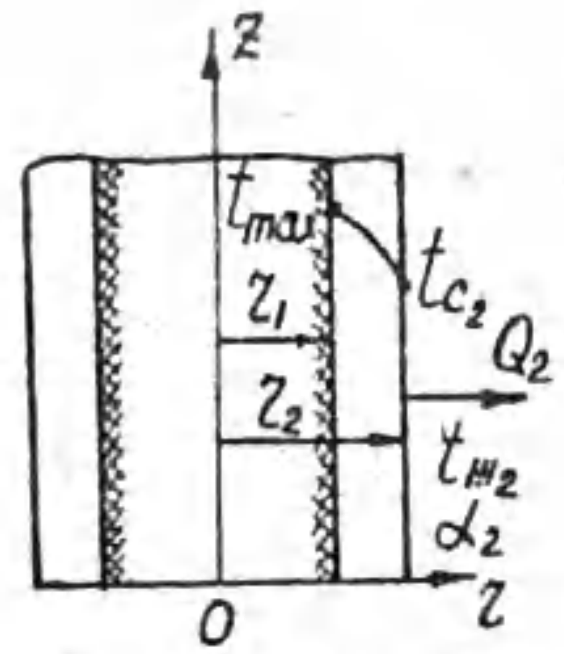
$$Q = q_v \cdot V, \ Вт$$

Цилиндрическая стенка

а) Охлаждение только по наружной поверхности

Дано: $r_1,\ r_2,\ q_v,\ \lambda,\ t_{ж_2},\ \alpha_2$.

Найти: $t=f(r)$, Q_2.



Математическая постановка задачи:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt}{dr} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \\ &\left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=r_1} = 0, \\ &-\lambda\left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=r_2} = \alpha_2(t_{c_2} - t_{ж_2}) \end{aligned}\right\} \qquad (I3)$$

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

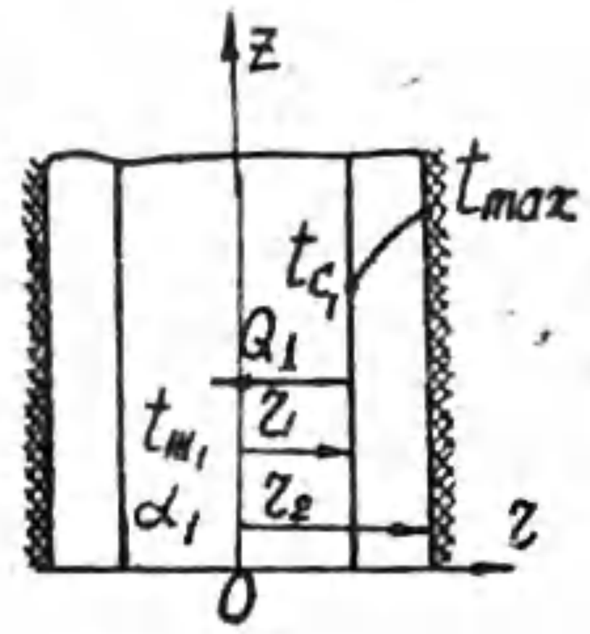
$$t = t_{ж_2} + \frac{q_v r_2}{2\alpha_2}\left[1-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right] + \frac{q_v r_2^2}{4\lambda}\left[1+\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 2\ln\frac{r}{r_2} - \left(\frac{r}{r_2}\right)^2\right]. \qquad (I4)$$

Запишите формулы для расчета $t_{max},\ t_{c_2},\ t_{max}-t_{c_2}$.

Теплота, рассеиваемая наружной поверхностью стенки,

$$Q_2 = q_v \cdot V = q_v \pi (r_2^2 - r_1^2) l.$$

б) Охлаждение только по внутренней поверхности



Дано: $r_1,\ r_2,\ q_v,\ \lambda,\ t_ж,\ \alpha_1$.

Найти: $t=f(r)$, Q_1.

Математическая постановка задачи:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt}{dr} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \\ &\left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=r_2} = 0, \\ &\lambda\left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=r_1} = \alpha_1(t_{c_1} - t_{ж_1}). \end{aligned}\right. \qquad (I5)$$

Уравнение температурного поля:

$$t = t_{ж_1} + \frac{q_v r_1}{2\alpha_1}\left[\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1\right] + \frac{q_v r_2^2}{4\lambda}\left[2\ln\frac{r}{r_1} + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 - \left(\frac{r}{r_2}\right)^2\right]. \qquad (I6)$$

Получите формулы для расчета $t_{max},\ t_{c_1},\ t_{max}-t_{c_1}$.

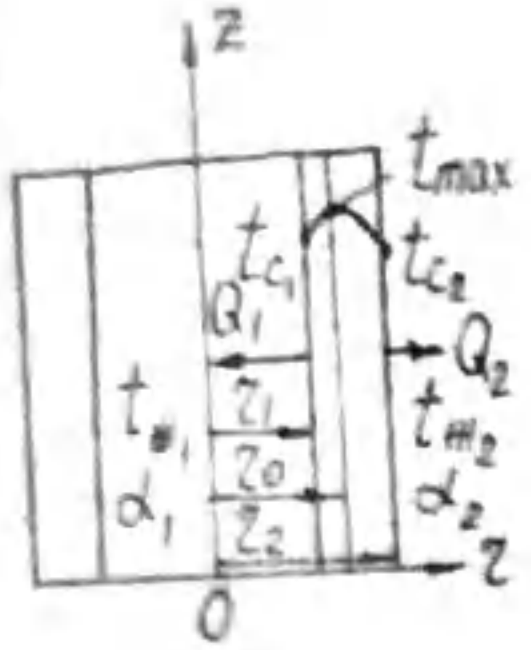
Теплота, рассеиваемая внутренней поверхностью стенки,

$$Q_1 = q_v V = q_v \pi (r_2^2 - r_1^2) l.$$

в) Охлаждение по внутренней и по наружной поверхностям

Дано: $r_1,\ r_2,\ q_v,\ \lambda,\ t_{ж_1},\ t_{ж_2},\ \alpha_1,\ \alpha_2$.

Математическая постановка задачи:



$$\left.\begin{aligned} &\frac{d^2t}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dt}{dr}+\frac{q_v}{\lambda}=0,\\ &\left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=r_0}=0,\\ &\text{при } r=r_1 \quad t=t_{c_1},\\ &\text{при } r=r_2 \quad t=t_{c_2}. \end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

Решение системы уравнений (17) дает следующие расчетные формулы

$$r_0^2=\frac{q_v(r_2^2-r_1^2)-4\lambda(t_{c_1}-t_{c_2})}{2q_v\ln\frac{r_2}{r_1}},$$

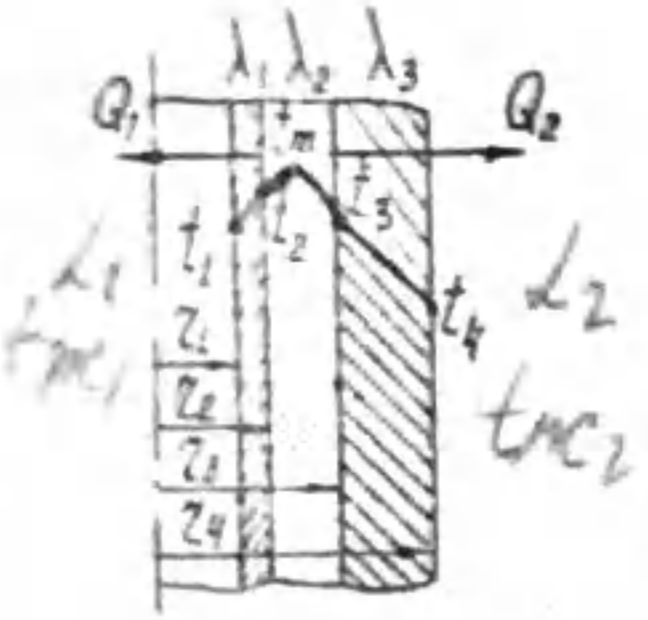
$$t_{max}-t_{c_2}=\frac{q_v r_0^2}{4\lambda}\left[\left(\frac{r_2}{r_0}\right)^2-2\ln\frac{r_2}{r_0}-1\right],$$

$$t_{max}-t_{c_1}=\frac{q_v r_0^2}{4\lambda}\left[\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2+2\ln\frac{r_0}{r_1}-1\right].$$

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, λ_1 = 80 Вт/м·°С, λ_2 = 15 Вт/м·°С, λ_3 = 3 Вт/м·°С, $t_{ж_1}$ = 382°С, α_1 = 300 Вт/м^2·°С, $t_{ж_2}$ = 20°С, α_2 = 100 Вт/м^2·°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:

$$\begin{cases} Q_1=q_v\pi l(r_0^2-r_2^2),\\ Q_2=q_v\pi l(r_3^2-r_0^2),\\ Q_2=\dfrac{t_3-t_{ж_2}}{\dfrac{1}{2\pi l\lambda_3}\ln\dfrac{r_4}{r_3}+\dfrac{1}{\alpha_2\pi d_4}},\\ Q_1=\dfrac{t_2-t_{ж_1}}{\dfrac{1}{2\pi l\lambda_1}\ln\dfrac{r_2}{r_1}+\dfrac{1}{\alpha_1\pi d_1}},\\ r_0^2=\dfrac{q_v(r_3^2-r_2^2)-4\lambda_2(t_2-t_3)}{2q_v\ln\dfrac{r_3}{r_2}}, \end{cases}$$

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

Максимальная температура в тепловыделяющем слое

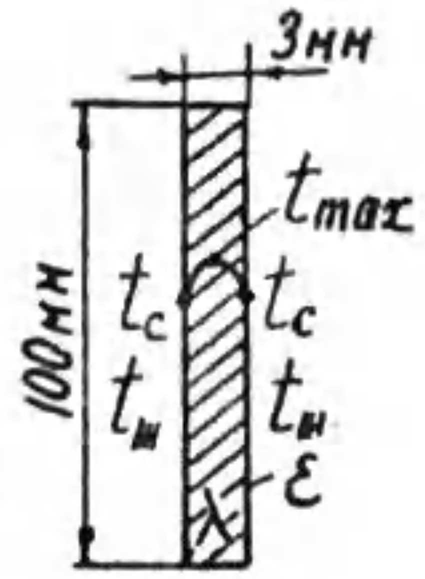
$$t_{max}=t_2+\frac{q_v r_0^2}{4\lambda_2}\left[\left(\frac{r_2}{r_0}\right)^2-2\ln\frac{r_2}{r_0}-1\right]=503{,}45\,°C.$$

Температуры t_1 и t_4 определяются из уравнений

$$Q_2=\alpha_2\pi d_4(t_4-t_{ж_2}),\qquad t_4=363{,}75\,°C.$$
$$Q_1=\alpha_1\pi d_1(t_1-t_{ж_1}),\qquad t_1=499{,}5\,°C.$$

З А Д А Ч И

Задача № 2-1

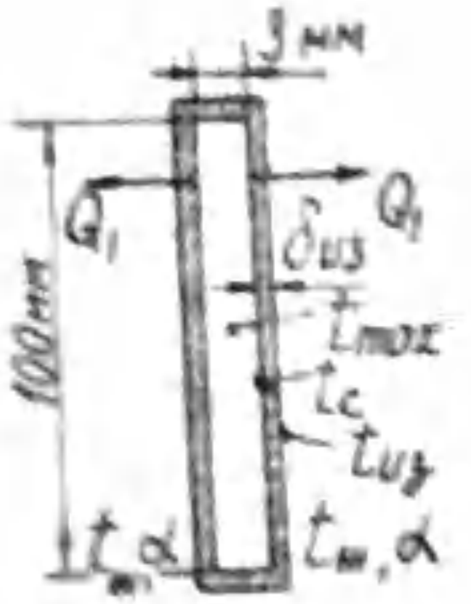


Допустимая нагрузка для стальных шин прямоугольного сечения 3х100 мм не должна превышать 300 А. Максимальная температура шин при температуре окружающего воздуха $t_ж$ = 25°С должна быть не выше 70°С.

Коэффициент теплопроводности λ = 64 Вт/м·°С, удельное электрическое сопротивление ρ = 0.13 ом·мм^2/м, степень черноты поверхности шины ε = 0.2.

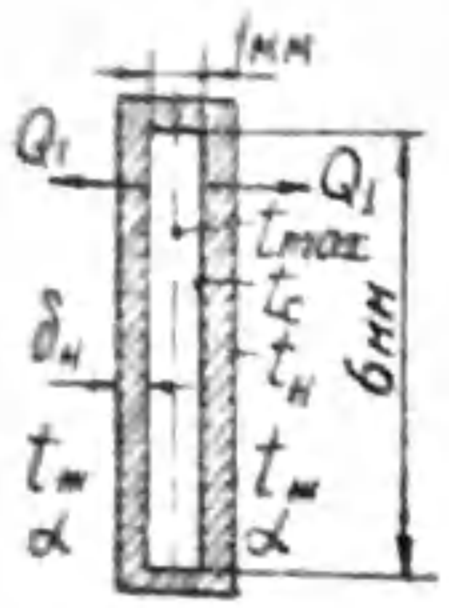
Рассчитать перепад температуры в шине и конвективную составляющую коэффициента теплоотдачи.

Задача № 2-2



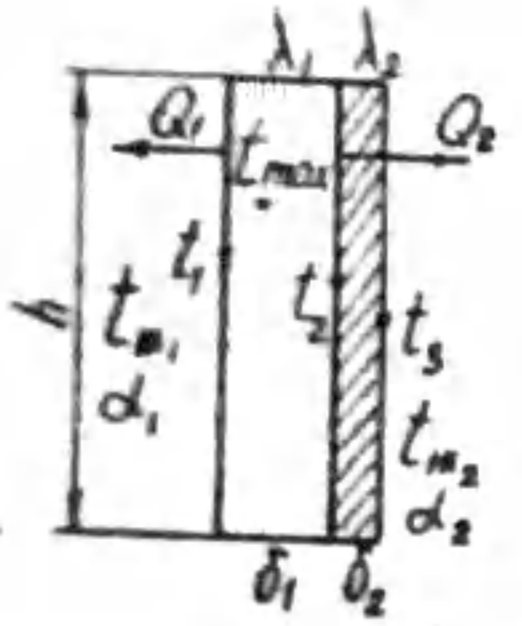
Стальная шина прямоугольного сечения 100х3 мм (λ = 50 Вт/м·°С) имеет электроизоляционный слой $\delta_{из}$ = 0,5 мм ($\lambda_{из}$ = 0.5 Вт/м·°С). Электрическая нагрузка J = 250 А (ρ = 0,13 Ом·мм²/м), $\varepsilon_{из}$ = 0,8, $t_ж$ = 20°С, α = 4,7 Вт/м²·°С. Рассчитать: теплоту Q_1, Вт/м, передаваемую с боковой поверхности шины, температуру на поверхности изоляции ($t_{из}$), перепады температур в шине и в слое изоляции. Теплоотдачей с торцов пренебречь. Учесть теплообмен излучением.

Задача № 2-3



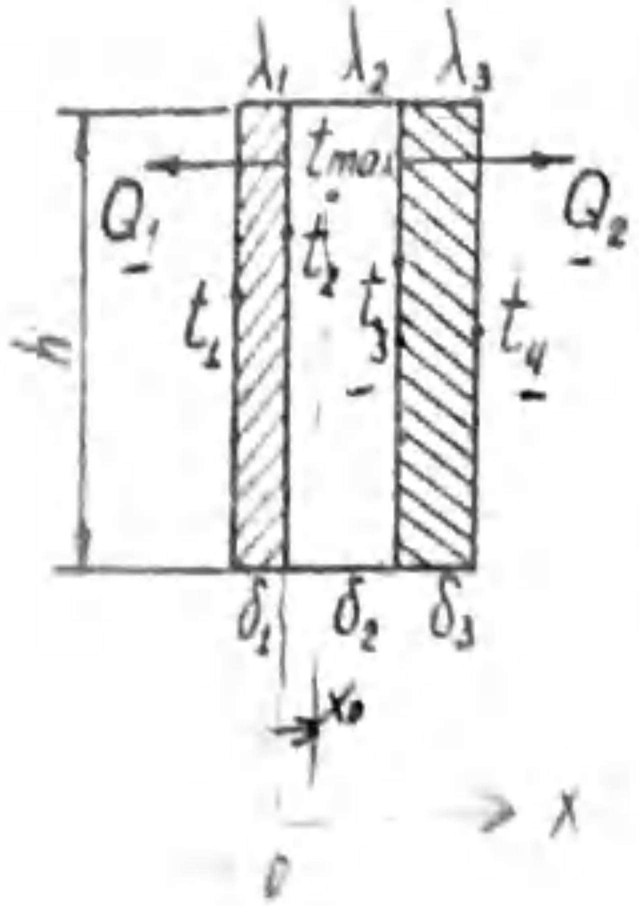
Константановая лента (λ = 20 Вт/м·°С) сечением 1х6 мм, длиной 1 м используется как кипятильник. Температура кипящей воды $t_ж$ = 100°С, α = 1000 Вт/м²·°С. Ток 20А, напряжение 200 В. На поверхности нагревателя образовалась накипь толщиной $\delta_н$ = 0.5 мм ($\lambda_н$ = 0,8 Вт/м·°С).
Рассчитать: теплоту Q_1, передаваемую с боковой поверхности нагревателя, температуры на поверхности накипи, на поверхности и в центре нагревателя. Теплоотдачей с торцов пренебречь.

Задача № 2-4



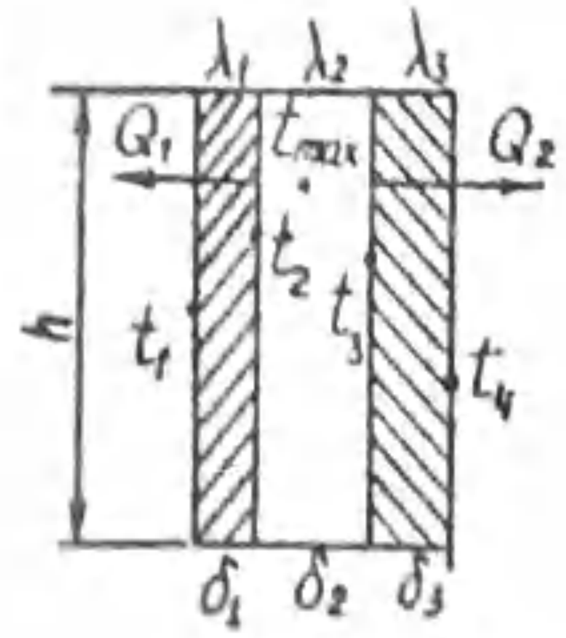
В двухслойной плоской стенке один слой толщиной δ_1 – с внутренним тепловыделением.
Дано: q_v = 10^7 Вт/м³, h = 1,5 м, δ_1 = 15 мм, λ_1 = 10 Вт/м·°С, δ_2 = 5 мм, λ_2 = 2 Вт/м·°С, $t_{ж_1}$ = 180°С, α_1 = 130 Вт/м²·°С, $t_{ж_2}$ = 30°С, α_2 = 85 Вт/м²·°С.
Рассчитать: теплоту, рассеиваемую боковыми поверхностями Q_1, $\frac{Вт}{м}$, Q_2, $\frac{Вт}{м}$, 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



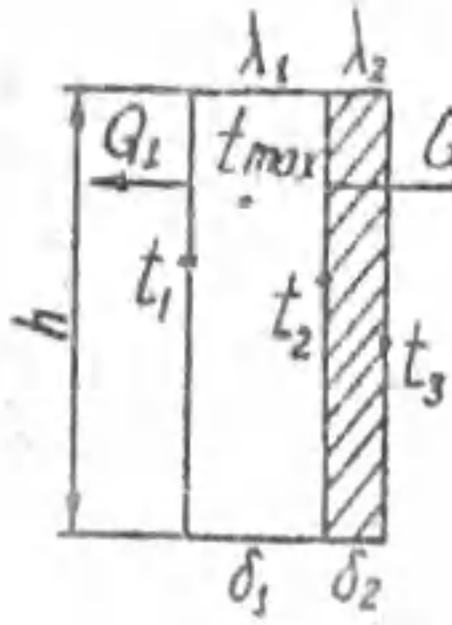
В трехслойной плоской стенке средний слой толщиной δ_2 – тепловыделяющий.
Дано: q_v = 10^7 Вт/м³, h = 2 м, δ_1 = 5 мм, λ_1 = 30 Вт/м·°С, δ_2 = 20 мм, λ_2 = 10 Вт/м·°С, δ_3 = 10 мм, λ_3 = 0.5 Вт/м·°С, Q_1 = $3\cdot10^5$ Вт/м, t_4 = 70°С.
Рассчитать: Q_2, $\frac{Вт}{м}$, координату максимальной температуры x_0 и максимальную температуру t_{max} тепловыделяющего слоя, температуры t_1, t_2, t_3. Теплоотдачей с торцов пренебречь.

Задача № 2-6



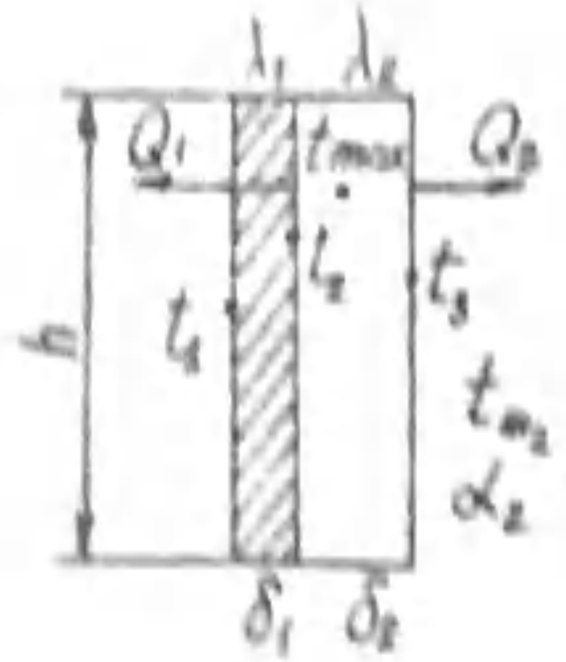
В трехслойной плоской стенке средний слой толщиной δ_2 – тепловыделяющий.
Дано: q_v = 10^7 Вт/м³, h = 2м, δ_1 = 5 мм, λ_1 = 30 Вт/м·°С, δ_2 = 20 мм, λ_2 = 10 Вт/м·°С, δ_3 = 10 мм, λ_3 = 0,5 Вт/м·°С, t_1 = 945°С, t_4 = 70°С.
Рассчитать: теплоту, рассеиваемую боковыми поверхностями Q_1, $\frac{Вт}{м}$, Q_2, $\frac{Вт}{м}$, 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 Вт/м³, h = 1,5 м, δ_1 = 15 мм, λ_1 = 10 Вт/м·°С, δ_2 = 5 мм, λ_2 = 2 Вт/м·°С, t_1 = 869°С, t_3 = 739,9°С.
Рассчитать: теплоту, рассеиваемую боковыми поверхностями Q_1, $\frac{Вт}{м}$, Q_2, $\frac{Вт}{м}$, координату максимальной температуры x_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, температуру t_2. Теплоотдачей с торцов пренебречь.

Задача № 2-8

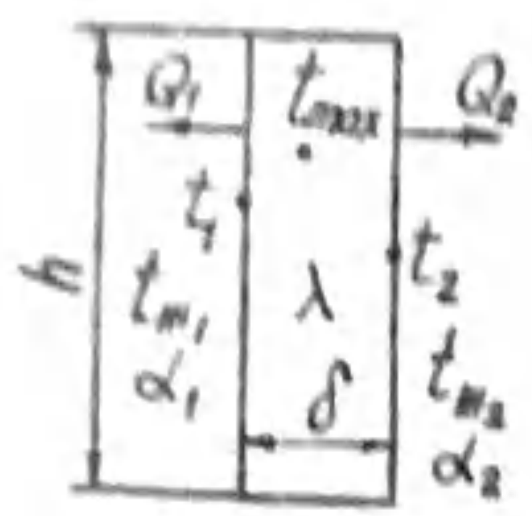


В двухслойной плоской стенке один слой толщиной δ_2 – тепловыделяющий.

Дано: δ_1 = 10 мм, λ_1 = 3 Вт/м·°С, δ_2 = 20мм, λ_2 = 10 Вт/м·°С, h = 2 м, $Q_1 = 7\cdot10^4$ Вт/м, $Q_2 = 13\cdot10^4$ Вт/м, $t_{ж_2}$ = 340°С, α_2 = 270 Вт/м²·°С.

Рассчитать: координату максимальной температуры x и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, температуры t_1, t_2, t_3. Теплоотдачей с торцов пренебречь.

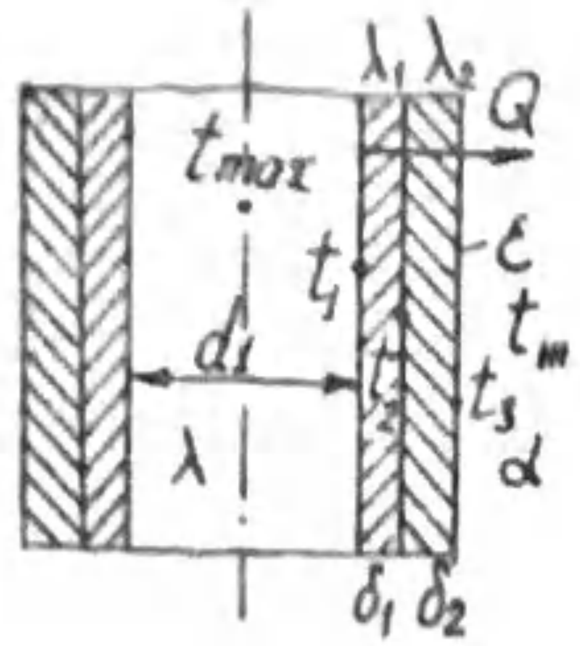
Задача № 2-9



Для пластины с внутренним тепловыделением дано: δ = 20 мм, h = 2 м, λ = 12 Вт/м·°С, $t_{ж_1}$ = 320°С, α_1 = 170 Вт/м²·°С, $t_{ж_2}$ = 80°С, α_2 = 350 Вт/м²·°С, $Q_1 = 9.58\cdot10^4$ Вт/м, $Q_2 = 30.42\cdot10^4$ 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.

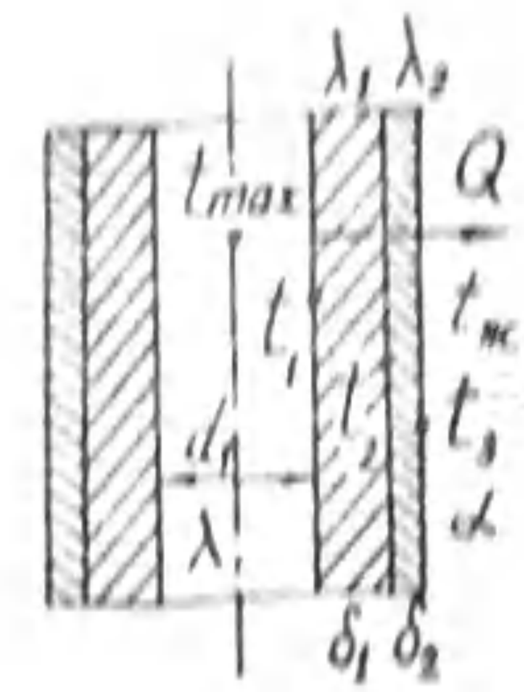
Задача № 2-10



Тепловыделяющий элемент с объемной плотностью тепловыделения q_v в форме цилиндра диаметром d_1, опрессованный электроизоляционным материалом толщиной δ_1, имеет металлическую оболочку толщиной δ_2. Дано: d_1 = 80 мм, λ = 15 Вт/м·°С, δ_1 = 3 мм, λ_1 = 3 Вт/м·°С, δ_2 = 5 мм, λ_2 = 45 Вт/м·°С, t_3 = 830°С, $t_ж$ = 20°С, α = 180 Вт/м²·°С, $q_v = 1{,}253\cdot10^7$ Вт/м³.

Рассчитать: передаваемую теплоту Q, $\frac{Вт}{м}$, 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.

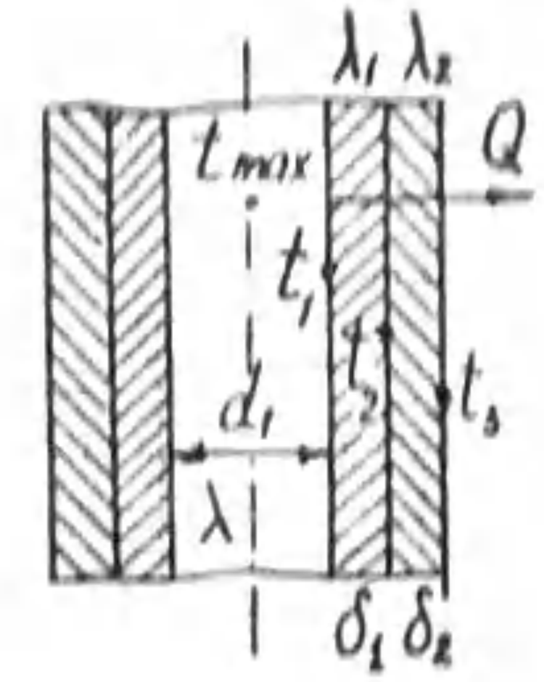
Задача № 2-11



Тепловыделяющий элемент с объемной плотностью тепловыделения q_v в форме цилиндра диаметром d_1, опрессованный электроизоляционным материалом толщиной δ_1, имеет металлическую оболочку толщиной δ_2. Дано: d_1 = 40 мм, λ = 15 Вт/м·°С, δ_1 = 10 мм, λ_1 = 5 Вт/м·°С, δ_2 = 5 мм, λ_2 = 50 Вт/м·°С, t_3 = 50°С, $t_ж$ = 20°С, α = 160 Вт/м²·°С

Рассчитать: Q, $\frac{Вт}{м}$, перепады температур t_2-t_3, t_1-t_2, температуру в центре элемента t_{max} и на поверхности t_1.

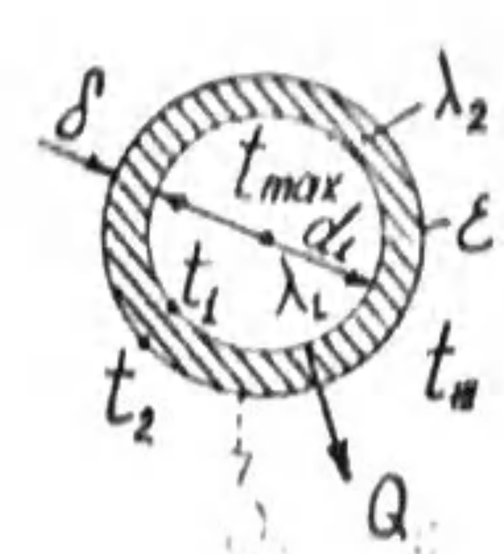
Задача № 2-12



Тепловыделяющий элемент с объемной плотностью тепловыделения q_v в форме цилиндра диаметром d_1, опрессованный электроизоляционным материалом толщиной δ_1, имеет металлическую оболочку толщиной δ_2. Дано: d_1 = 40 мм, λ = 15 Вт/м·°С, δ_1 = 8 мм, λ_1 = 3 Вт/м·°С, δ_2 = 8 мм, λ_2 = 80 Вт/м·°С, t_3 = 50°С, q_v = 10 МВт/м³.

Рассчитать: Q, $\frac{Вт}{м}$, 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, λ_1 = 20 Вт/м·°С, температура в центре элемента t_{max} = 1280°С, на поверхности элемента t_1 = 976°С, $t_ж$ = 50°С, ε = 0,45, δ = 7 мм, λ_2 = 42 Вт/м·°С.

Рассчитать: q_v, $\frac{Вт}{м^3}$, Q, $\frac{Вт}{м}$, t_2, конвективную составляющую теплоотдачи $Q_к$, Вт/м, лучистую составляющую теплоотдачи $Q_л$, Вт/м.

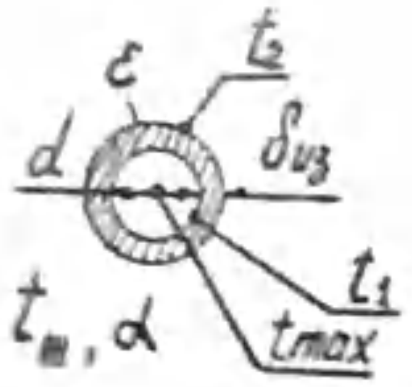
Задача № 2-14

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

Дано: d_1 = 85 мм, λ_1 = 15 Вт/м·°С, δ = 5 мм, λ_2 = 36 Вт/м·°С, t_2 = 560°С, $t_ж$ = 35°С, α = 230 Вт/м^2·°С, ε = 0,62.

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

Задача № 2-15

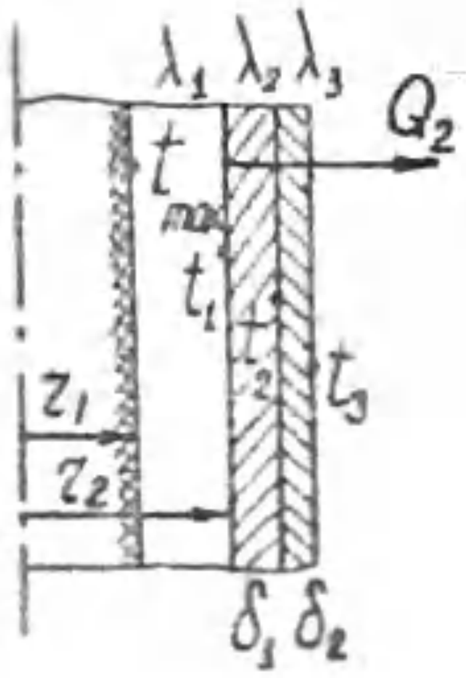


Алюминиевый провод диаметром d покрыт резиновой изоляцией толщиной $\delta_{из}$ и находится под напряжением. Температура окружающего воздуха $t_ж$.

Дано: d = 2 мм, λ = 204 Вт/м·°С, $\delta_{из}$ = 1 мм, $\lambda_{из}$ = 0,16 Вт/м·°С, удельное электрическое сопротивление $\rho = 2{,}62\cdot10^{-8}$ Ом·м, ток J = 24,4 А, $t_ж$ = 20°С, α = 10 Вт/м^2·°С, ε = 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

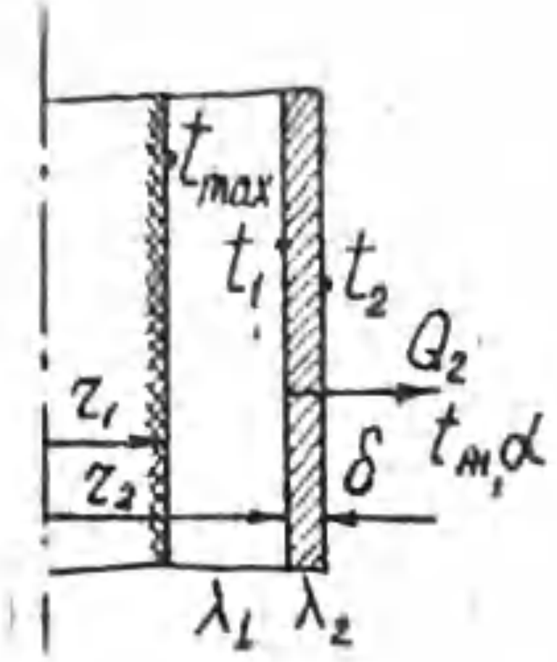


Тепловыделяющий элемент в форме трубы отделяется от охлаждающего его теплоносителя слоем графита толщиной δ_1 и металлической оболочкой толщиной δ_2. Теплоотвод только по наружной поверхности.

Дано: r_1 = 40 мм, r_2 = 52 мм, δ_1 = 5 мм, δ_2 = 3 мм, λ_1 = 10 Вт/м·°С, λ_2 = 158 Вт/м·°С, λ_3 = 50 Вт/м·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м^3, t_3 = 750°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

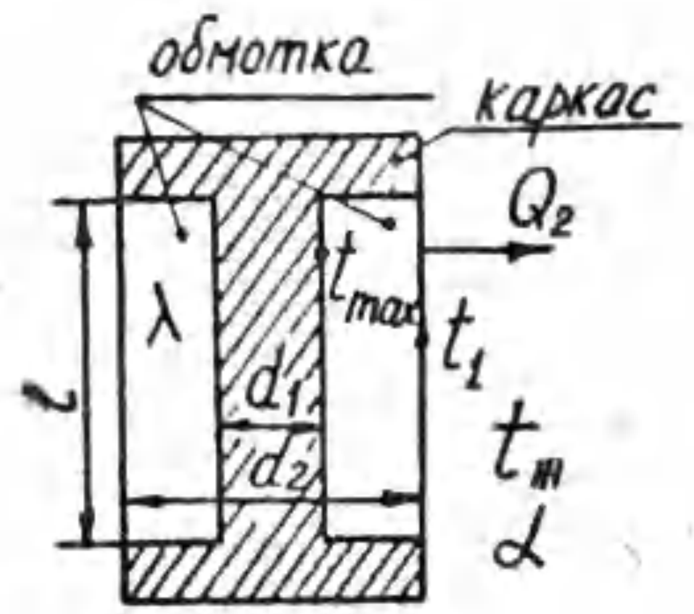


Тепловыделяющий элемент в форме трубы заключен в металлическую оболочку толщиной δ и охлаждается жидким теплоносителем. Теплоотвод с внутренней поверхности элемента отсутствует (Q_1 = 0).

Дано: r_1 = 40 мм, r_2 = 50 мм, δ = 3 мм, λ_1 = 10 Вт/м·°С, λ_2 = 45 Вт/м·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м^3, $t_ж$ = 180°С, α = 200 Вт/м^2·°С.

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

Задача № 2-18

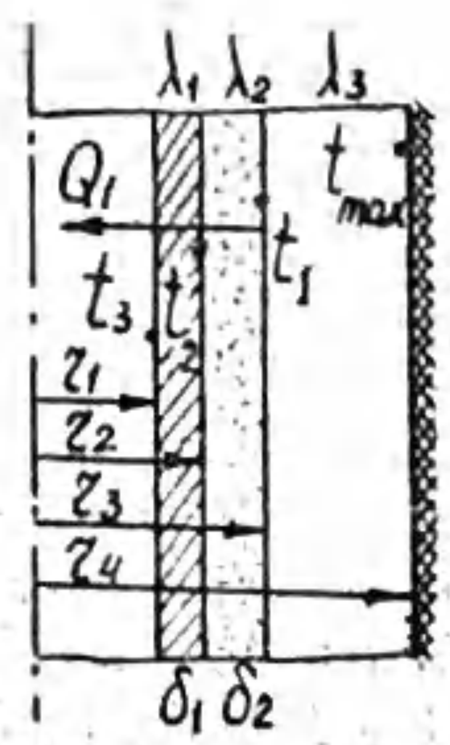


Обмотка из медного провода находится под напряжением. Теплоотвод – только с наружной поверхности.

Дано: электрическая мощность N = 112,1 Вт, λ = 15 Вт/м·°С, d_1 = 70 мм, d_2 = 150 мм, ℓ = 30 см, температура воздуха $t_ж$ = 20°С, α = 10 Вт/м^2·°С, степень черноты поверхности обмотки ε = 0,8.

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

Задача № 2-19

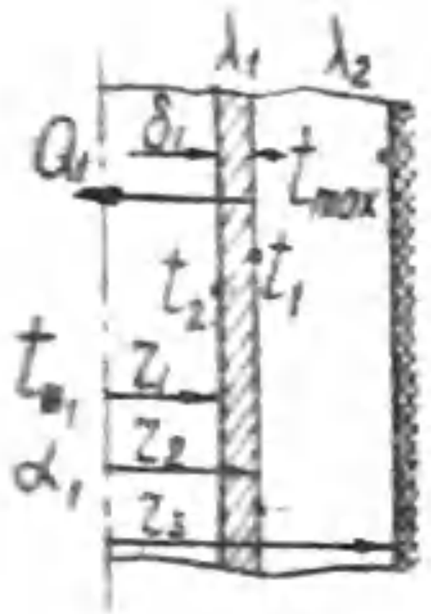


Тепловыделяющий элемент в форме трубы по наружной поверхности теплоизолирован (Q_2 = 0). Внутренняя поверхность элемента отделена от теплоносителя, с помощью которого отводится теплота Q_1, металлической оболочкой толщиной δ_1 и слоем графита толщиной δ_2.

Дано: r_3 = 40 мм, r_4 = 52 мм, δ_1 = 3 мм, δ_2 = 5 мм, λ_1 = 30 Вт/м·°С, λ_2 = 158 Вт/м·°С.

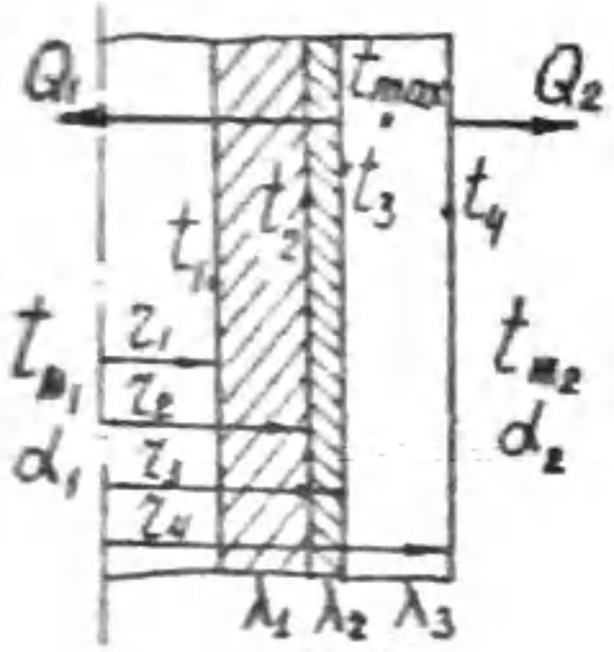
λ_3 = 10 Вт/м·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³, t_3 = 720°С.
Рассчитать: Q_1, вт/м, максимальную и минимальную температуры в тепловыделяющем элементе, перепады температур по толщине металлической оболочки и по толщине слоя графита.

Задача № 2-20



Тепловыделяющий элемент в форме трубы по наружной поверхности изолирован (Q_2 = 0). Внутренняя поверхность элемента от теплоносителя с температурой $t_{ж_1}$, с помощью которого отводится теплота Q_1, отделена металлической оболочкой толщиной δ_1.
Дано: r_2 = 40 мм, r_3 = 52 мм, δ_1 = 3 мм, λ_1 = = 30 Вт/м·°С, λ_2 = 10 Вт/м·°С, $t_{ж_1}$ = 180°С, α_1 = = 230 Вт/м²·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³.
Рассчитать: Q_1, вт/м, максимальную и минимальную температуры в тепловыделяющем элементе, перепад температур по толщине металлической оболочки.

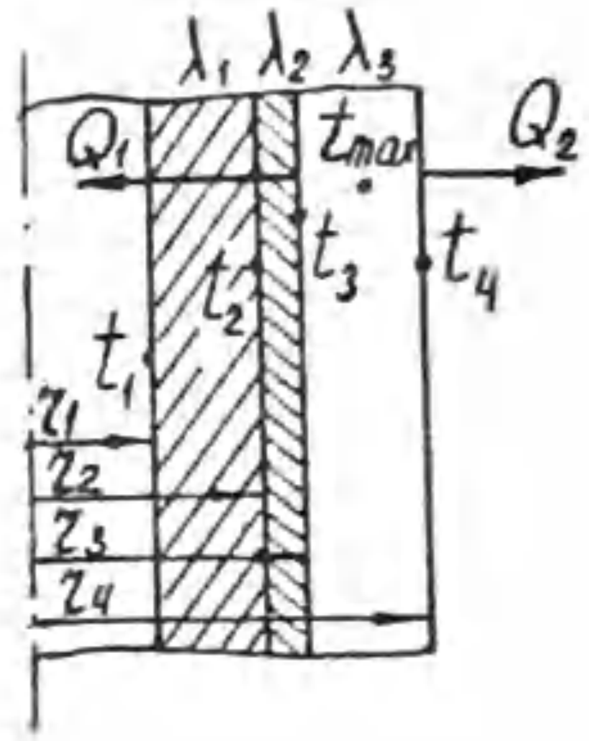
Задача № 2-21



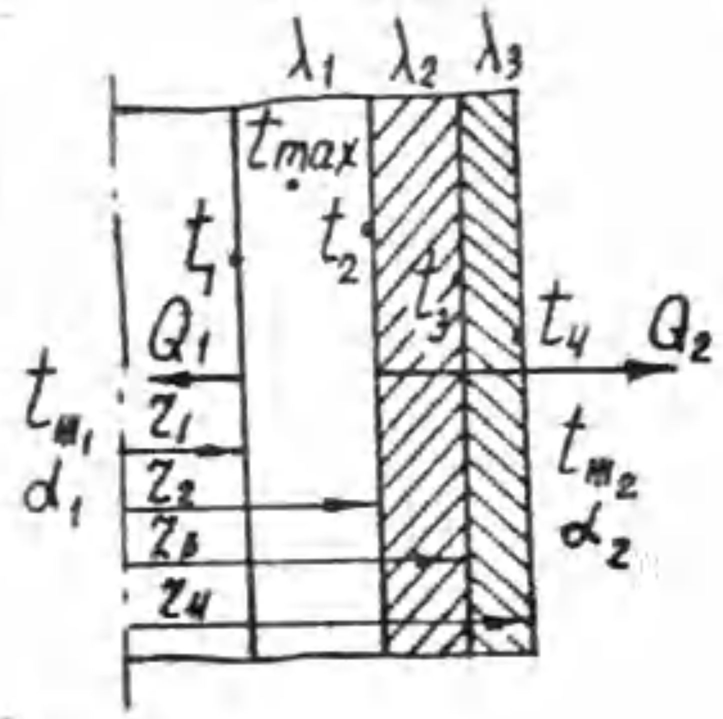
Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим наружным слоем, дано: r_1 = 20 мм, r_2 = 30 мм, r_3 = 32 мм, r_4 = 40 мм, λ_1 = 3 Вт/м·°С, λ_2 = 80 Вт/м·°С, λ_3 = 15 Вт/м·°С, $t_{ж_1}$ = 20°С, α_1 = 100 Вт/м²·°С, $t_{ж_2}$ = 150°С, α_2 = 93 Вт/м²·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³.
Рассчитать: координату максимальной температуры r_0 и максимальную температурv t_{max} в тепловыделяющем слое, Q_1, вт/м, Q_2, вт/м, t_1, t_2, t_3, t_4.

Задача № 2-22

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, λ_1 = 3 Вт/м·°С, λ_2 = 80 Вт/м·°С, λ_3 = 15 Вт/м·°С, t_1 = 522,5°С, Q_2 = 11775 Вт/м, $q_v = 10^7$ Вт/м³.
Рассчитать: координату максимальной температуры r_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, Q_1, вт/м, t_2, t_3, t_4.

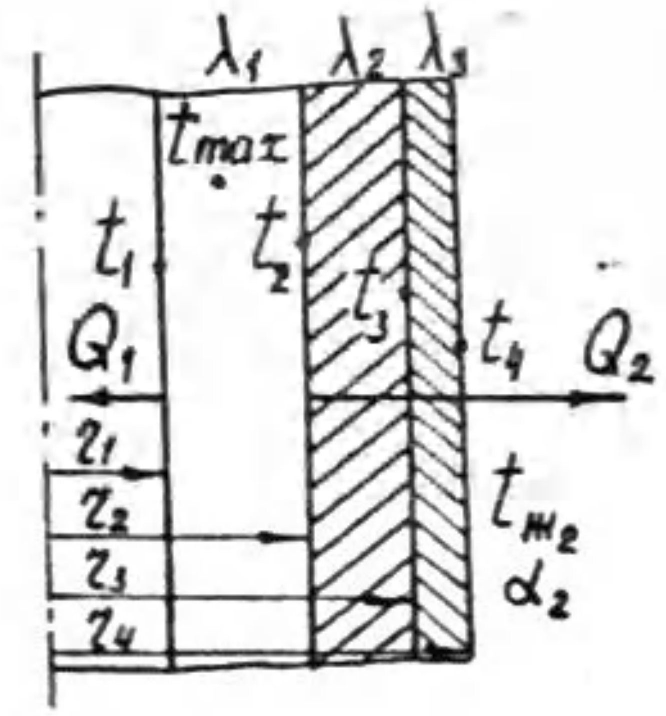


Задача № 2-23



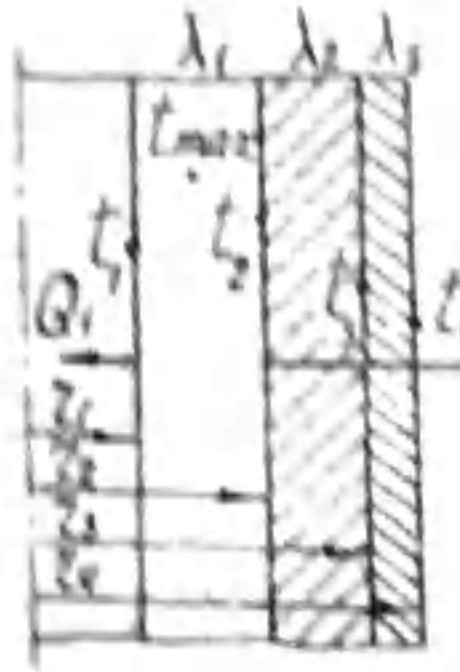
Для трехслойной цилиндрической стенки с тепловыделяющим внутренним слоем дано: r_1 = = 28 мм, r_2 = 34 мм, r_3 = 38 мм, r_4 = 40 мм, λ_1 = 15 Вт/м·°С, λ_2 = 3 Вт/м·°С, λ_3 = = 80 Вт/м °С, $q_v = 10^7$ Вт/м³, α_1 = 50 Вт/м²·°С, $t_{ж_1}$ = 80°С, α_2 = 120 Вт/м²·°С, $t_{ж_2}$ = 20°С.
Рассчитать: координату максимальной температуры r_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, t_1, t_2, Q_1, вт/м, Q_2, вт/м, t_3, t_4.

Задача № 2-24



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, λ_1 = 15 Вт/м·°С, λ_2 = 3 Вт/м·°С, λ_3 = 80 Вт/м·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³, α_2 = 100 Вт/м²·°С, $t_{ж_2}$ = 20°С, Q_1 = 4[illegible] Вт/м.
Рассчитать: координату максимальной температуры r_0 и максимальную температуру [illegible] в тепловыделяющем слое, Q_2, вт/м, t_1, t_3, t_4.

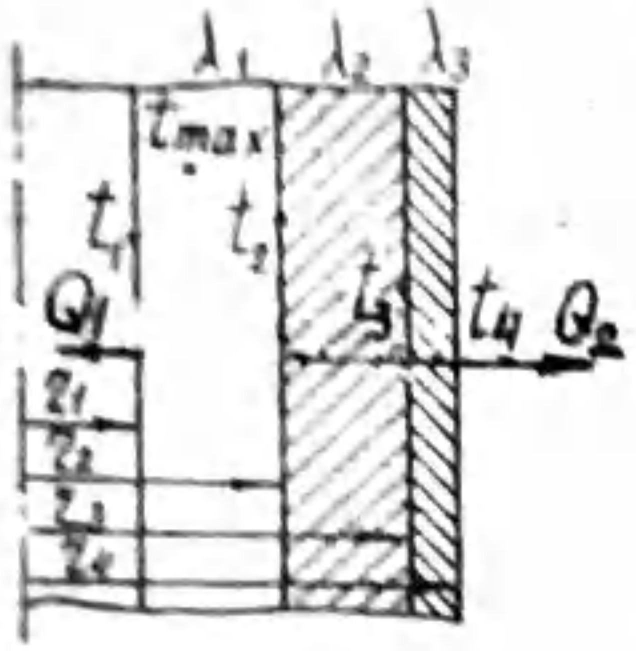
Задача № 2-25



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, λ_1 = 15 Вт/м·°С, λ_2 = 3 Вт/м·°С, λ_3 = 80 Вт/м·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³, Q_1 = 3642,4 Вт/м, Q_2 = 8038,4 Вт/м, t_4 = 50°С.

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

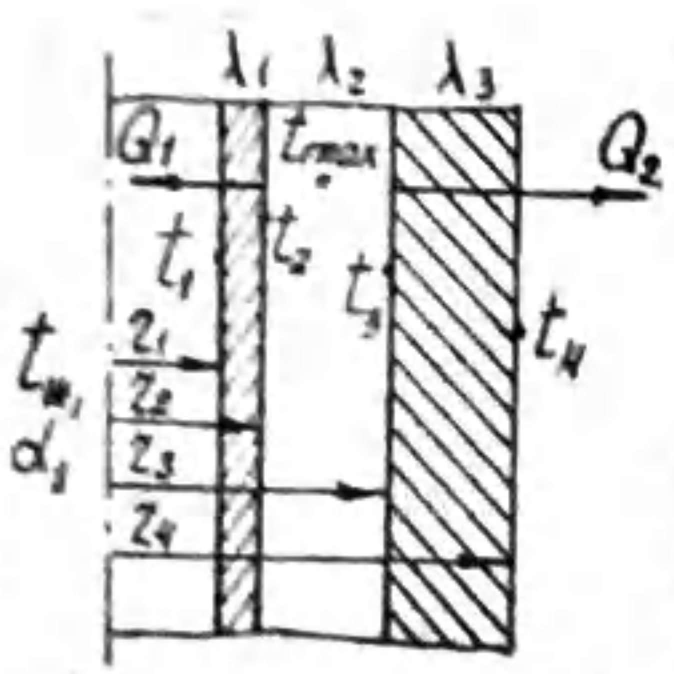
Задача № 2-26



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, λ_1 = 15 Вт/м·°С, λ_2 = 3 Вт/м·°С, λ_3 = 80 Вт/м·°С, t_1 = 200°С, t_4 = 50°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³.

Рассчитать координату максимальной температуры r_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, t_2, Q_1, Вт/м, Q_2, Вт/м.

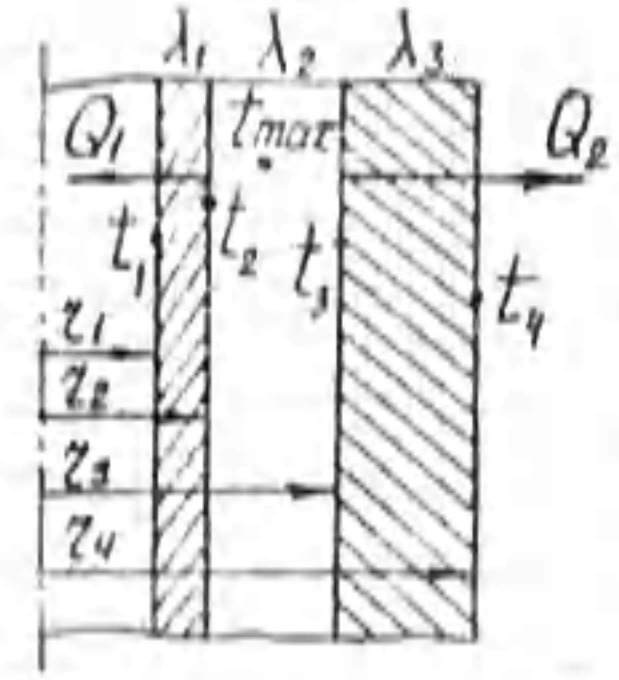
Задача № 2-27



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, λ_1 = 80 Вт/м·°С, λ_2 = 15 Вт/м·°С, α_1 = 272,8 Вт/м²·°С, $t_{ж_1}$ = 50°С, полная теплота, рассеиваемая боковыми поверхностями трехслойной стенки $Q = Q_1 + Q_2$ = 13060 Вт/м, t_4 = 200°С, λ_3 = 3 Вт/м·°С.

Рассчитать: координату максимальной температуры r_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, Q_1, Вт/м, Q_2, Вт/м, t_1, t_2, t_3.

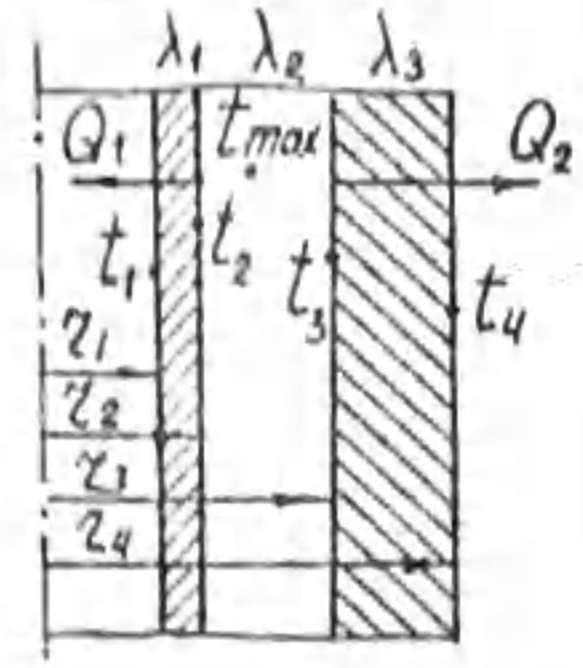
Задача № 2-28



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, λ_1 = 80 Вт/м·°С, λ_2 = 15 Вт/м·°С, λ_3 = 3 Вт/м·°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³, Q_1 = 7693 Вт/м, t_4 = 200°С.

Рассчитать: координату максимальной температуры r_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, Q_2, Вт/м, t_1, t_2, t_3.

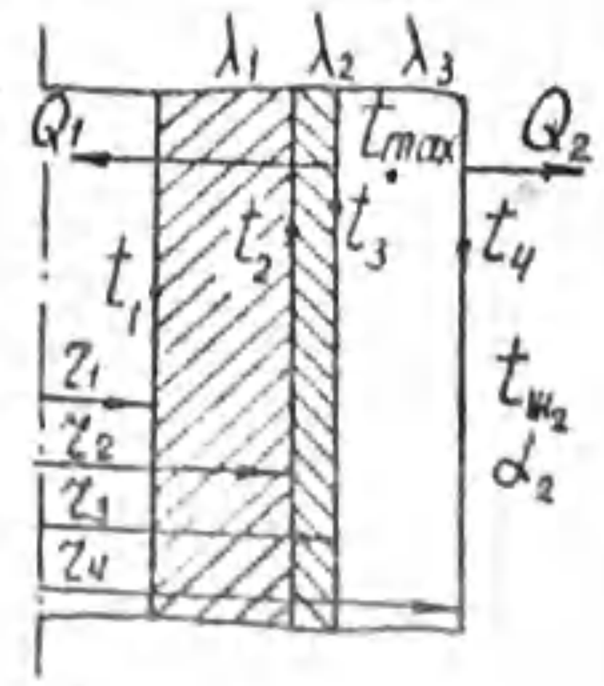
Задача № 2-29



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, λ_1 = 80 Вт/м·°С, λ_2 = 15 Вт/м·°С, λ_3 = 3 Вт/м·°С, t_1 = 600°С, t_4 = 464,2°С, $q_v = 10^7$ Вт/м³.

Рассчитать: координату максимальной температуры r_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, Q_1, Вт/м, Q_2, Вт/м, 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, λ_1 = 3 Вт/м·°С, λ_2 = 80 Вт/м·°С, λ_3 = 15 Вт/м·°С, t_1 = 522,5°С, $t_{ж_2}$ = 150°С, α_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 r_0 и максимальную температуру t_{max} в тепловыделяющем слое, Q_1, Вт/м, Q_2, Вт/м, t_2, t_3, t_4.

УДК 536.7

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 Ю.А.Загромов

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Условные обозначения: a , м^2/с – коэффициент температуропроводности; c , Дж/кг·$^\circ$С – теплоемкость; ρ , кг/м^3 – плотность; V, м^3 – объем; τ , с – время; α ,Вт/м$^2\cdot^\circ$С – коэффициент теплоотдачи; $t_ж$, $^\circ$С – температура среды; $\Theta = \frac{t - t_ж}{t_н - t_ж}$ – безразмерная температура; $\bar{\vartheta} = \bar{t} - t_ж$ – средний перегрев, $\vartheta_н = t_н - t_ж$ – начальный перегрев; q_v , Вт/м^3 – плотность внутреннего тепловыделения.

Охлаждение (нагрев) неограниченной пластины

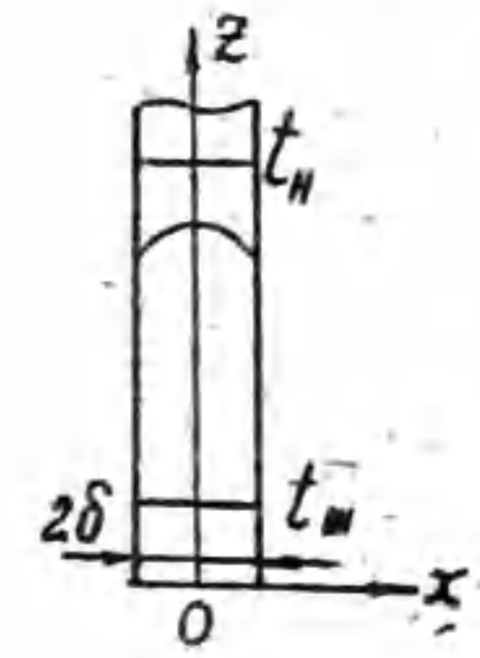


Рис.1

Математическая постановка задачи:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \\ &\text{при } \tau = 0 \quad t = t_н, \\ &-\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=\pm\delta} = \alpha(t_c - t_ж). \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Решением системы уравнений (1) является уравнение температурного поля в безразмерном виде:

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

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

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

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

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

Средняя температура пластины $\bar{\Theta} = \frac{\bar{t} - t_ж}{t_н - t_ж}$ в каждый момент времени τ может быть вычислена по формуле

$$\bar{\Theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)}\, e^{-\mu_n^2 Fo}. \qquad (4)$$

При $Fo > 0,3$ в (2) и (4) можно ограничиться первым членом ряда. При этом обеспечивается достаточная точность результатов расчета.

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

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

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

$$\bar{\Theta} = e^{-Bi \cdot Fo} \qquad (7)$$

и мало отличается от температур в центре ($\Theta_{x=0}$) и на поверхности ($\Theta_{x=1}$) пластины.

При $Bi > 100$ (интенсивное охлаждение поверхности)

$$\left.\begin{aligned} &\Theta_{x=L} = 0, \\ &\Theta_{x=0} = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

Охлаждение (нагрев) неограниченного цилиндра

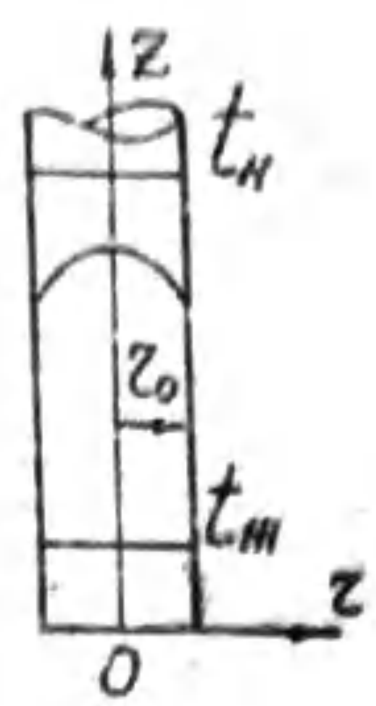


Рис.2

Математическая постановка задачи:

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

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

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

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

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

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

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

Средняя температура цилиндра

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

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

$$\Theta = A_1 J_0(\mu_1 R) e^{-\mu_1^2 Fo}, \qquad (13)$$

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

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

$$\bar{\Theta} = e^{-2Bi\, Fo} \qquad (15)$$

Расчет тепла

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

$$Q = Q_n(1-\Theta), \qquad (16)$$

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

$$Q_n = c\rho V(t_н - t_ж) \qquad (17)$$

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

$$\Theta_1 = \Theta_{x=L} \cdot \Theta_{z=1}.$$

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

$$\Theta_2 = \Theta_{x=1} \cdot \Theta_{y=0} \cdot \Theta_{z=0}$$

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

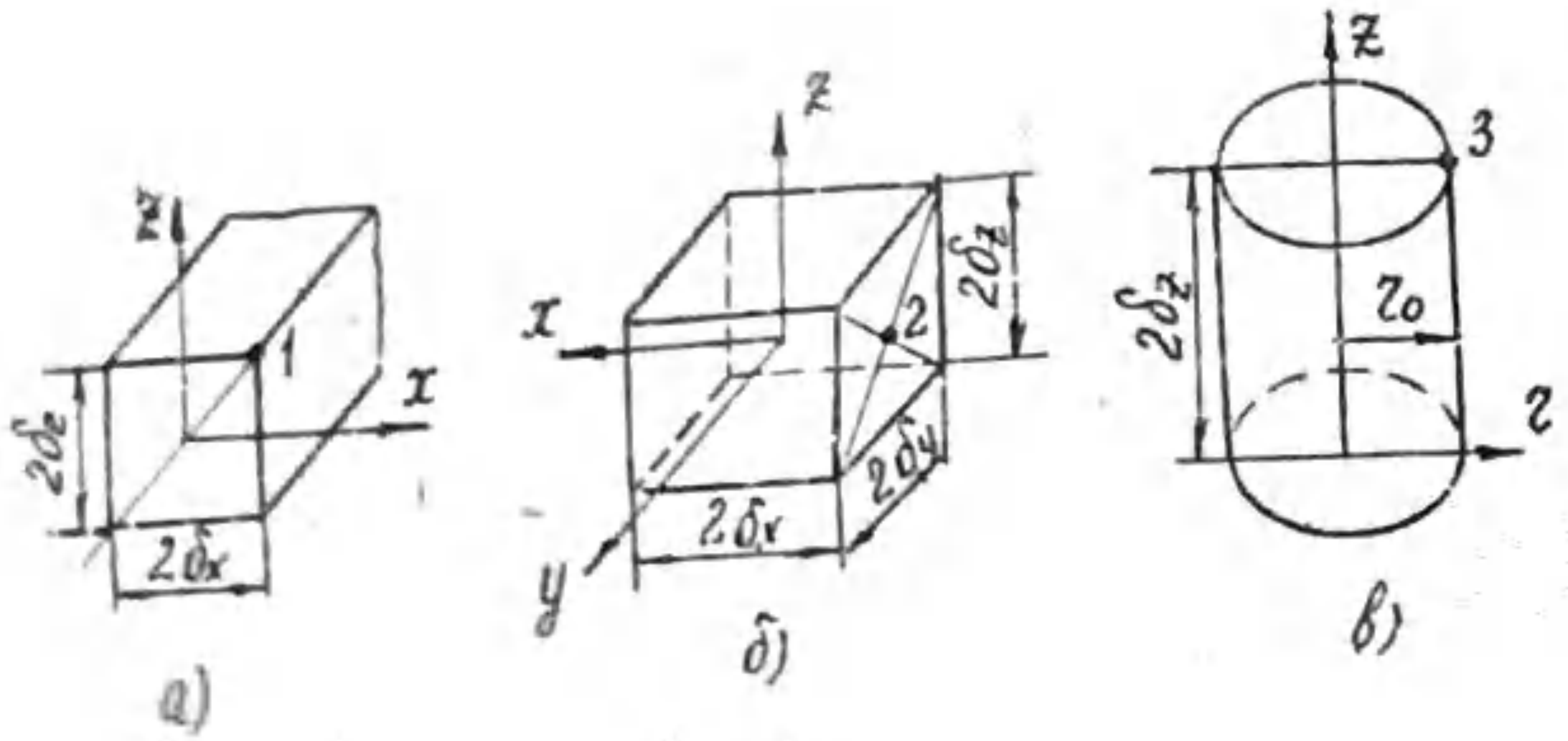


Рис. 3

$2\delta_z$, температура кромки торцевой поверхности

$$\Theta_3 = \Theta_{R=1} \cdot \Theta_{Z=1}$$

Для определения безразмерных температур бесконечных тел Θ_x, Θ_y, Θ_z, Θ_R рассчитывают $Fo_x = \frac{a\tau}{\delta_x^2}$, $Bi_x = \frac{\alpha \delta_x}{\lambda}$, 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 во времени.

Уравнение теплового баланса проводника электрического тока

$$dQ_1 - dQ_2 = dH, \ Дж,$$

где $dQ_1 = q_v V d\tau$, Дж – Джоулева теплота,

$dQ_2 = \alpha F(\bar{t} - t_ж)\, d\tau$, Дж – теплота, рассеиваемая поверхностью охлаждения F в окружающую среду,

$dH = c\rho V d\bar{t}$, Дж – увеличение энтальпии проводника при прогреве,

и начальное условие являются математической постановкой задачи:

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

Решением системы уравнений (18) является уравнение температурного поля

$$\bar\vartheta = \left(\vartheta_н^0 - \frac{q_v V}{\alpha F}\right) e^{-\frac{\alpha F \tau}{c\rho V}} + \frac{q_v V}{\alpha F}. \qquad (19)$$

При $t_н = t_ж$ $(\vartheta_н = 0)$

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

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

$$\bar\vartheta = \vartheta_н^0 e^{-\frac{\alpha F \tau}{c\rho V}}. \qquad (21)$$

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 $t_н$, охлаждается в среде с температурой $t_ж$. 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.

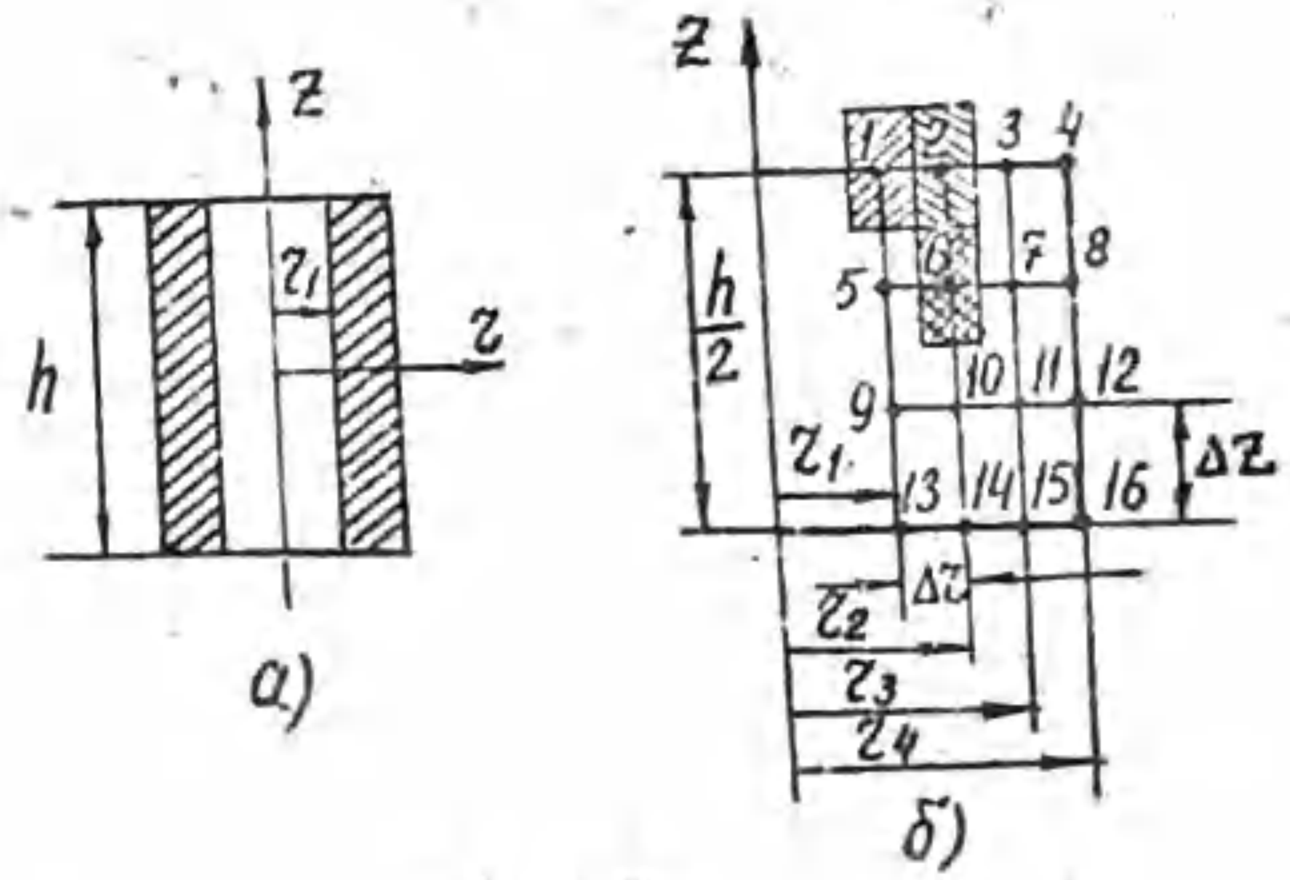


Рис. 4

Вследствие симметрии температурного поля трубы относительно осей z и r, рассмотрим температурное поле 1/4 части трубы (рис. 4,б).

Разделим стенку трубы с помощью отрезков Δr и Δz на элементарные объемы (кольца прямоугольного сечения). Полученные точки пересечения 1,2,3...16 являются расчетными. Каждая из этих точек лежит в центре некоторого элементарного объема (Д[illegible] точек I,2,6 сечения этих объемов заштрихованы).

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

$$Q_{r-\Delta r}+Q_{r+\Delta r}+Q_{z-\Delta z}+Q_{z+\Delta z}=c\rho V\left(t_{\tau+\Delta\tau}-t_{\tau}\right),$$

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

Тепловые потоки в элементарный объем могут передаваться теплопроводностью

$$dQ_r=-\lambda F_r\frac{dt}{dr}d\tau, \qquad dQ_z=-\lambda F_z\frac{dt}{dz}d\tau$$

или конвекцией

$$dQ_r=\alpha(t_{ж}-t)F_r\,d\tau, \qquad dQ_z=\alpha(t_{ж}-t)F_z\,d\tau.$$

Заменяя дифференциалы dt , dr , dz , $d\tau$ конечными разностями Δt , Δr , Δz , $\Delta\tau$, запишем уравнения теплового баланса для нескольких элементарных объемов с расчетными точками внутри.

С точкой 6:

$$\lambda F_1\frac{t_5-t_6}{\Delta r}\Delta\tau+\lambda F_2\frac{t_7-t_6}{\Delta r}\Delta\tau+\lambda F_3\frac{t_{10}-t_6}{\Delta z}\Delta\tau+\lambda F_3\frac{t_2-t_6}{\Delta z}\Delta\tau=$$

$$=c\rho V(t_6'-t_6). \quad F_1=2\pi\left(r_2-\frac{\Delta r}{2}\right)\Delta z, \quad F_2=2\pi\left(r_2+\frac{\Delta r}{2}\right)\Delta z,$$

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

Аналогичные уравнения запишутся для элементарных объемов с точками 7,10,II,I4,I5.

С точкой I:

$$\alpha F_1(t_{ж}-t_1)\Delta\tau+\lambda F_2\frac{t_2-t_1}{\Delta r}\Delta\tau+\lambda F_3\frac{t_5-t_1}{\Delta z}\Delta\tau+\alpha F_3(t_{ж}-t_1)\Delta\tau=$$

$$=c\rho V(t_1'-t_1), \quad F_1=2\pi r_1\frac{\Delta z}{2}, \quad F_2=2\pi\left(r_1+\frac{\Delta r}{2}\right)\frac{\Delta z}{2},$$

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

Аналогичное уравнение запишется для элементарного объема с точкой 4.

С точкой 2:

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

$$=c\rho V(t_2'-t_2), \quad F_1=2\pi\left(r_2-\frac{\Delta r}{2}\right)\frac{\Delta z}{2},$$

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

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

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,I3,8,I2,6.

Полученные уравнения для I6 элементарных объемов записывают относительно температур t_1', t_2' и т.д.

$$\left.\begin{aligned} t_1'&=a_1t_{ж}+a_2t_2+a_3t_5+a_4t_1,\\ t_2'&=a_1't_{ж}+a_2't_1+a_3't_3+a_4't_6+a_5't_2, \end{aligned}\right\}\qquad(22)$$

и т.д.

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

В начальный момент времени (τ = 0) все температуры t_{1-16} одинаковы и равны $t_н$. 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 выбирать шаги по координатам Δr , Δz и по времени $\Delta\tau$?

Как показывает анализ, устойчивость системы уравнений (22) обеспечивается при условии: а) для одномерных задач при $F_o=\frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2}\le 0{,}5$; б) для двухмерных задач при $F_o\le 0{,}25$.

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 ($t_ж$) во времени.

Пример решения задачи

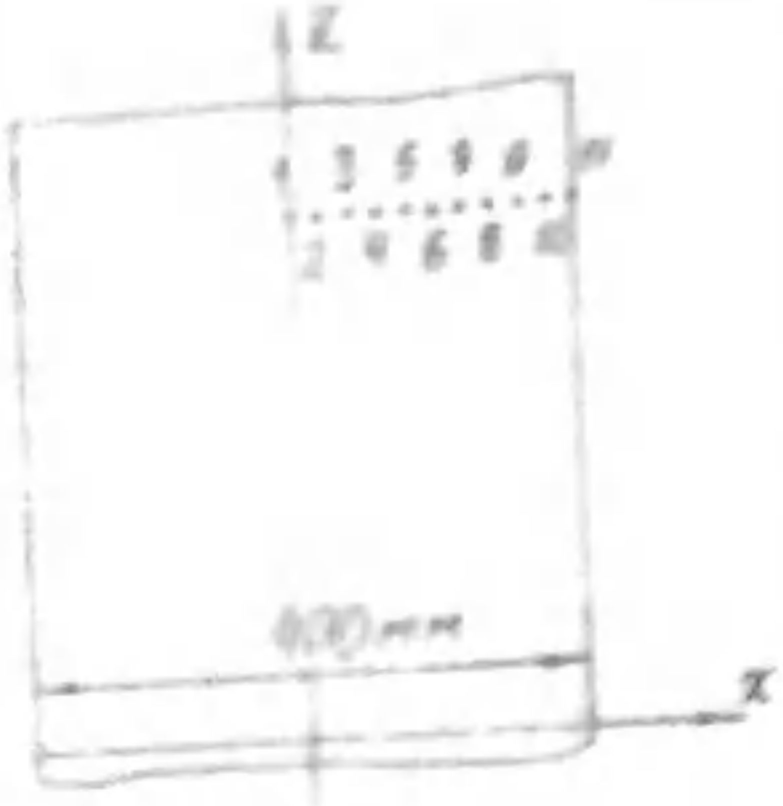


Рис. 5

Плита из бронзы (λ = 64 Вт/м·°С, ρ = = 8000 кг/м², c = 38I Дж/кг·°С) неограниченной протяженности толщиной 400мм, имеющая начальную температуру 900°С, охлаждается в среде с $t_ж$ = 20°С. Коэффициент теплоотдачи на поверхности плиты в процессе охлаждения α = I60 Вт/м²·°С. Рассчитать температурное поле плиты (температуры в точках с координатами X = 0; 0.I , 0.2 и т.д. до X = I) через τ = = I0 мин. после начала ее охлаждения:

а) используя уравнение температурного поля (2);

б) используя метод тепловых балансов и теплоту, переданную за τ = I0 мин с I м² поверхности плиты в окружающую среду (q).

Р е ш е н и е

Коэффициент температуропроводности бронзы

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

Числа Био и Фурье

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

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

$$\Theta_i = A_1 \cos(\mu_1 X_i)\, e^{-\mu_1^2 Fo},$$

$$\Theta_i = \frac{t_i - t_ж}{t_н - t_ж},$$

где μ_1 = 0,649I , A_1 = I,0697 взяты из [6] для безграничной пластины при Bi = 0,5. Полученные температуры $t_1 \div t_{11}$ приведены в табл.I.

Теплота, переданная за I0 мин охлаждения плиты в окружающую среду с I м² поверхности

$$q = q_п\,(1 - \bar{\Theta}).$$

Полная теплота, выделенная I м² поверхности плиты в процессе ее охлаждения до температуры окружающей среды,

$$q_п = \frac{Q_п}{F_{охл}} = \frac{c\rho V}{F_{охл}}(t_н - t_ж) = \frac{c\rho\, 2\delta F}{2F}(t_н - t_ж) =$$

$$= c\rho\delta(t_н - t_ж) = 381 \cdot 8000 \cdot 0{,}2\,(900 - 20) = 5{,}36 \cdot 10^8\ \frac{Дж}{м^2}.$$

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

$$q = 536\ (I - 0{,}887) = 60{,}5\ мДж/м^2.$$

Численный метод расчета температурного поля

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

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

т.е. устойчивость системы расчетных уравнений обеспечивается.

Точки 2,3,4...I0 расположены внутри элементарного объема толщиной Δx . Через боковые поверхности f этого объема теплота передается теплопроводностью, и через каждый промежуток времени $\Delta\tau$ = 5 с температура этих точек t_i снижается до t_i'.

Для точки 2:

$$\lambda \frac{t_1 - t_2}{\Delta x} f \Delta\tau + \lambda \frac{t_3 - t_2}{\Delta x} f \Delta\tau = c\rho V\,(t_2' - t_2),$$

для точки 3:

$$\lambda \frac{t_2 - t_3}{\Delta x} f \Delta\tau + \lambda \frac{t_4 - t_3}{\Delta x} f \Delta\tau = c\rho V\,(t_3' - t_3).$$

Аналогично запишутся уравнения для точек 4,5...I0.

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

$$\lambda \frac{t_2 - t_1}{\Delta x} f \Delta\tau = c\rho \frac{V}{2}(t_1' - t_1).$$

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

$$\lambda \frac{t_{10} - t_{11}}{\Delta x} f \Delta\tau + \alpha f\,(t_ж - t_{11})\Delta\tau = c\rho \frac{V}{2}(t_{11}' - t_{11}).$$

Примем f = I м², тогда $V = f\Delta x = \Delta x$, м³.

Уравнения, записанные для II точек, разрешим относительно температур $t_1' \div t_{11}'$. Получим систему линейных алгебраических уравнений

$$
\begin{aligned}
t_1' &= 2Fo\,t_2 + (1-2Fo)\,t_1,\\
t_2' &= Fo\,t_1 + Fo\,t_3 + (1-Fo)\,t_2,\\
t_3' &= Fo\,t_2 + Fo\,t_4 + (1-2Fo)\,t_3,\\
t_4' &= Fo\,t_3 + Fo\,t_5 + (1-2Fo)\,t_4,\\
t_5' &= Fo\,t_4 + Fo\,t_6 + (1-2Fo)\,t_5,\\
t_6' &= Fo\,t_5 + Fo\,t_7 + (1-2Fo)\,t_6,\\
t_7' &= Fo\,t_6 + Fo\,t_8 + (1-2Fo)\,t_7,\\
t_8' &= Fo\,t_7 + Fo\,t_9 + (1-2Fo)\,t_8,\\
t_9' &= Fo\,t_8 + Fo\,t_{10} + (1-2Fo)\,t_9,\\
t_{10}' &= Fo\,t_9 + Fo\,t_{11} + (1-2Fo)\,t_{10},\\
t_{11}' &= 2Fo\,t_{10} + (1-2Fo\,Bi-2Fo)\,t_{11} + 2Fo\,Bi\,t_{ж},
\end{aligned}
\tag{23}
$$

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

Чтобы найти температуры в точках I-II через τ = IO мин после начала охлаждения плиты, необходимо произвести расчет температур $t_1' \div t_{11}'$ по уравнениям (23) $\tau/\Delta\tau = 600/5 = 120$ раз.

При первом расчете вместо температур $t_1 \div t_{11}$ подставляется начальная температура $t_н$, 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	IO	II
t, °C по (3)-(5)	844,3	842,6	837,4	828,8	8I6,7	80I,3	782,6	760,7	735,7	707,6	676,7
t, °C числ.	840,92	839,30	834,42	826,27	8I4,82	800,04	78I,9I	760,42	735,6I	707,5I	676,23

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

З А Д А Ч И

У к а з а н и е . Номограммами $\theta_{x=0} = f_1(Bi, Fo)$, $\theta_{x=1} = f_2(Bi, Fo)$, $\theta_{R=0} = f_3(Bi, Fo)$, $\theta_{R=1} = f_4(Bi, Fo)$ 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-I

Резиновый лист толщиной 40 мм, нагретый до температуры I50°C, помещен в воздушную среду с температурой I5°C.

Определить температуру на поверхности и в середине листа через 30 минут после начала охлаждения. Теплопроводность резины λ = 0,I7 Вт/м·°C, коэффициент температуропроводности $a = 8{,}3\cdot10^{-8}$ м²/с, коэффициент теплоотдачи на поверхности пластины α = 27 Вт/м²·°C.

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

Задача № I-2

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

Температура среды 20°C. Теплофизические характеристики стали: λ = 45 Вт/м·°C, c = 0,46 кДж/кг·°C, ρ = 7900 кг/м³, коэффициент теплоотдачи на поверхности листа α = 35 Вт/м²·°C.

Задача № I-3

Плита толщиной 300 мм имеет температуру I50°C. С момента начала охлаждения плита с одной стороны омывается воздухом с $t_ж$ = 20°C. Коэффициент теплоотдачи α = 30 Вт/м²·°C.

Определить количество теплоты, теряемое площадью I м² поверхности плиты за I час охлаждения, а также температуру поверхности плиты к этому моменту времени. Теплопроводность материала плиты λ = 0,4 Вт/м·°C, коэффициент температуропроводности $a = 3\cdot10^{-7}$ м²/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 I250 К. Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке α = 870 Вт/м²·°C, теплофизические свойства материала: λ = 35 Вт/м·°C, $a = 1{,}4\cdot10^{-5}$ м²/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 $t_ж = 2500^{\circ}C$. 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 $\alpha = 3500$ Вт/м$^2\cdot^{\circ}$C, начальная температура вкладыша 20°C, теплофизические свойства графита: $\lambda = 147$ Вт/м$\cdot^{\circ}$C, $a = 110\cdot10^{-6}$ м^2/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 $\alpha = 30$ Вт/м$^2\cdot^{\circ}$C, теплопроводность стали $\lambda = 45$ Вт/м$\cdot^{\circ}$C, коэффициент температуропроводности $a = 1{,}25\cdot10^{-5}$ м^2/с.

Определить температуры в середине, на поверхности плиты и на расстоянии 50 мм от середины плиты через I 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 $\alpha = 40$ Вт/м$^2\cdot^{\circ}$C.

Определить время прогрева листа до $t = 200^{\circ}$C, если его начальная температура равнялась 20°C. Теплопроводность материала $\lambda = 0{,}174$ Вт/м$\cdot^{\circ}$C, коэффициент температуропроводности $a = 5{,}8\cdot10^{-8}$ м^2/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 $\lambda = 0{,}174$ Вт/м$\cdot^{\circ}$C, коэффициент температуропроводности $a = 5{,}8\cdot10^{-8}$ м^2/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: $\lambda = 17$ Вт/м$\cdot^{\circ}$C, $c = 0{,}5$ кДж/кг$\cdot^{\circ}$C, $\rho = 7900$ кг/м^3. На наружной поверхности сопла – адиабатные условия, внутренняя поверхность омывается газами. Диаметр сопла $d \gg \delta = 2$ 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 Вт/м$^2\cdot^{\circ}$C.

Задача № I-10

Большая плита из нержавеющей стали ($\lambda = 30$ Вт/м$\cdot^{\circ}$C, $a = 1{,}5\cdot10^{-5}$ м^2/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 $\alpha = 500$ Вт/м$^2\cdot^{\circ}$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, $a = 10^{-5}$ м^2/с, $\alpha = 400$ Вт/м$^2\cdot^{\circ}$C, $\lambda = 40$ Вт/м$\cdot^{\circ}$C.

Сколько времени нужно поверхность пластины обдувать воздухом, чтобы температура ее поверхности понизилась до 200°С? Каковы температуры на расстоянии 1 и 10 см от обдуваемой поверхности в момент времени, когда температура обдуваемой поверхности достигнет 200°С?

Задача № 1-12

Длинный чугунный цилиндр диаметром d = 0,2 м (λ = 70 Вт/м·°С, $a = 2\cdot10^{-5}$ м^2/с) имеет начальную температуру 400°С. Наружная поверхность цилиндра охлаждается воздухом с температурой 50°С при коэффициенте теплоотдачи α = 420 Вт/м^2·°С.

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 № 1-13

Длинные металлические стержни (λ = 45 Вт/м·°С, $a = 2\cdot10^{-5}$ м^2/с) диаметром d = 0,05 м помещены в печь для термической обработки. Температура в печи 600°С, начальная температура стержней 60°С.

Сколько времени стержни должны оставаться в печи, чтобы их средняя температура достигла 400°С? Каков перепад температур в стержне? Коэффициент теплоотдачи α = 120 Вт/м^2·°С.

Задача № 1-14

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°С, помещают в печь и вынимают, когда он просмолится на глубину 10 см. Установлено, что температура на глубине 10 см составляет 100°С.

Найти время выдерживания столба в печи, если температура в ней 350°С, α = 145 Вт/м^2·°С. Теплофизические свойства дерева: λ = 0,2 Вт/м·°С, $a = 1,1\cdot10^{-7}$ м^2/с.

Задача № 1-15

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

Определить коэффициент теплоотдачи, если после 1 часа нагрева температура на оси вала достигла 850°С. Определить также температуру на поверхности вала в этот момент времени. Теплопроводность материала λ = 18 Вт/м·°С, коэффициент температуропроводности $a = 6,12\cdot10^{-6}$ м^2/с.

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

Задача № 1-16

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

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

Коэффициент теплоотдачи на поверхности вала α = 120 Вт/м^2·°С, теплопроводность λ = 18 Вт/м·°С, коэффициент температуропроводности $a = 6,12\cdot10^{-6}$ м^2/с.

Задача № 1-17

Стальной брусок с размерами боковых граней 40 мм и 80 мм, имеющий начальную температуру 700°С, погружается в жидкий воздух ($t_ж$ = – 183 °С). Для стали: λ = 35 Вт/м·°С, $a = 1,11\cdot10^{-5}$ м^2/с. Коэффициент теплоотдачи α = 580 Вт/м^2·°С.

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

Задача № 1-18

Стальной брусок с размерами боковых граней 40 мм и 80 мм, имеющий начальную температуру 700°С, погружается в жидкий воздух ($t_ж$ = –183 °С). Для стали: λ = 35 Вт/м·°С, $a = 1,11\cdot10^{-5}$ м^2/с. Коэффициент теплоотдачи α = 580 Вт/м^2·°С.

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

Задача № 1-19

Стальной брусок сечением 40х80 мм, имеющий начальную температуру 400°С, погружается в жидкий воздух ($t_ж$ = – 183°С). Для стали: λ = 35 Вт/м·°С, $a = 1.11\cdot10^{-5}$ м^2/с. Коэффициент теплоотдачи α = 580 Вт/м^2·°С.

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

Задача № I-20

Стальной брусок сечением 40x80 мм, имеющий начальную температуру 600°С, погружается в жидкий воздух ($t_ж$ = - 183°С).

Для стали: λ = 35 Вт/м·°С, a = 1,11·10^{-5} м²/с. Коэффициент теплоотдачи α = 580 Вт/м²·°С.

Какими 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°С, охлаждается на воздухе, температура которого 20°С.

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

Коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра α = 120 Вт/м²·°С, теплопроводность материала λ = 25 Вт/м·°С, коэффициент температуропроводности a = 6·10^{-6} м²/с.

Задача № I-22

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

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

Коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра α = 120 Вт/м²·°С, теплопроводность материала λ = 25 Вт/м·°С, коэффициент температуропроводности a = 6·10^{-6} м²/с.

Задача № I-23

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

Определить температуры в середине торцевой поверхности ($t_т$) и в середине боковой поверхности ($t_б$) цилиндра через 20 минут после начала его охлаждения.

Коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра α = 120 Вт/м²·°С, теплопроводность материала λ = 25 Вт/м·°С, коэффициент температуропроводности a = 6·10^{-6} м²/с.

Задача № I-24

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

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 α = 120 Вт/м²·°С, теплопроводность материала λ = 25 Вт/м·°С, коэффициент температуропроводности a = 6·10^{-6} м²/с.

Задача № I-25

Заготовка в форме куба со стороной 500 мм имела начальную температуру 20°С. Заготовка помещена в нагревательную печь с температурой среды 1200°С. Коэффициент теплоотдачи к поверхности заготовки α = = 140 Вт/м²·°С, теплофизические характеристики материалы: λ = 37 Вт/м·°С, a = 7·10^{-6} м²/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°С. Заготовка помещена в нагревательную печь с температурой среды 1500°С. Коэффициент теплоотдачи к поверхности заготовки α = 120 Вт/м²·°С, теплофизические характеристики материала: λ = 37 Вт/м·°С, a = 7·10^{-6} м²/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°С. Заготовка помещена в нагревательную печь с температурой среды 1500°С. Коэффициент теплоотдачи к поверхности заготовки α = 120 Вт/м²°С, теплофизические характеристики материала: λ = 37 Вт/м·°С, a = 7·10^{-6} м²/с.

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

Задача № I-28

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 α = = 120 Вт/м$^2\cdot$°C, теплофизические характеристики материала: λ = 37 Вт/м·°C, $a = 7\cdot10^{-6}$ м^2/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 α = 18 Вт/м$^2\cdot$°C, теплофизические свойства бетона: λ = 1,28 Вт/м·°C, C = 1,13 кДж/кг·°C, ρ = 2300 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 (α = 85 Вт/м$^2\cdot$°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: λ = 202 Вт/м·°C, C = 0,92 кДж/кг·°C, ρ = 2670 кг/м^3.

Задача № I-31

Медная трубка с d_2/d_1 = 30/25 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 $t_ж$ = 10°C?

Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубки α = 20 Вт/м$^2\cdot$°C, теплоотдачей с внутренней поверхности пренебречь. Теплоемкость меди C = 381 Дж/кг·°C, плотность ρ = 8800 кг/м^3.

Задача № I-32

Небольшой медный (C = 381 Дж/кг·°C, ρ = 8800 кг/м^3) наконечник после отливки вынимают из формы при температуре 650°C и охлаждают в баке с жидкостью (α = 790 Вт/м$^2\cdot$°C, $t_ж$ = 75°C). Объем наконечника 1,75 см^3, площадь его поверхности 3,5 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 мм, ℓ = 100 мм (λ = 30 Вт/м·°C, $a = 1,5\cdot10^{-5}$ м^2/с) прогревается в печи с температурой 1000°C. Начальная температура трубы 20°C, коэффициент теплоотдачи при прогреве 40 Вт/м$^2\cdot$°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 Вт/м$^2\cdot$°C.

Задача № I-34

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

Рассчитать время нагрева ($\tau_{нагр}$) и охлаждения ($\tau_{охл}$) резца с размерами 5х40х300 мм (λ = 30 Вт/м·°C, $a = 1,5\cdot10^{-5}$ м^2/с).

Температура в печи 1000°C, средняя температура нагрева резца 850°C, коэффициент теплоотдачи при нагреве $\alpha_{нагр}$ = 80 Вт/м$^2\cdot$°C. Охлаждение происходит в воде с температурой 20°C, средняя температура охлажденного резца 40°C, коэффициент теплоотдачи при охлаждении $\alpha_{охл}$ = 600 Вт/м$^2\cdot$°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 мм нагреется до температуры 110°C при протекании тока J = 9400 А.

Труба находится в спокойном воздухе с $t_ж$ = 40°C, коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубы α = 15 Вт/м$^2\cdot$°C. Теплоотдачей с внутренней поверхности пренебречь. Удельное электрическое сопротивление меди $\rho = 1,75\cdot10^{-8}$ Ом м, теплоемкость C = 381 Дж/кг·°C, плотность ρ = 8800 кг/м^3.

Задача № I-36

Найти температуру медного проводника диаметром 20 мм, который в течение 1,5 секунд нагружается током J = 32000 А. В начальный момент времени проводник находился в спокойном воздухе при температуре $t_ж$ = 0°C. Удельное электрическое сопротивление меди $\rho = 1,75\cdot10^{-8}$

Ом·м, теплоемкость c = 381 Дж/кг·°С, плотность ρ = 8800 кг/м³. Коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника α = 17 Вт/м²·°С.

Задача № 1-37

Какова будет температура алюминиевой (c = 920 Дж/кг·°С, ρ = 2670 кг/м³) 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°С. Коэффициент теплоотдачи α = 20 Вт/м²·°С.

Задача № 1-38

Электродетонатор имеет форму цилиндра диаметром 0,1 мм, длиной 5 мм. Он находится в воздухе ($t_ж$ = 30°С, α = 10 Вт/м²·°С). Теплофизические свойства детонатора: λ = 20 Вт/м·°С, $a = 5\cdot10^{-5}$ м²/с, электрическое сопротивление R = 0,2 Ом, температура плавления материала детонатора 900°С.

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 $t_ж$ = 20°С. Начальная температура плиты $t_н$ = 900°С. 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:

а) используя уравнение температурного поля (2);

б) численным методом.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2.

№ вар.	Материал плиты	2δ, мм	α, Вт/м²·°С	τ, мин.
1	БРОНЗА	400	160	20
2	λ = 64 Вт/м·°С	300	119,5	30
3	c = 381 Дж/кг·°С	400	160	40
4	ρ = 8000 кг/м³	600	149,3	25

Продолжение табл. 2

№ вар.	Материал плиты	2δ, мм	α, Вт/м²·°С	τ, мин.
5	БРОНЗА	800	128	55
6	λ, c, ρ см. вар. 1-4	900	142,2	60
7	СТАЛЬ	400	158,9	30
8	λ = 45,4 Вт/м·°С	600	181,6	55
9	c = 462 Дж/кг·°С	500	99,9	45
10	ρ = 7900 кг/м³	300	181,6	35
11		600	136,2	40
12	МЕДЬ	400	307,2	20
13	λ = 384 Вт/м·°С	600	128	40
14	c = 381 Дж/кг·°С	500	122,9	50
15	ρ = 8800 кг/м³	400	115,2	45
16		500	184,3	35
17	АЛЮМИНИЙ	400	163,2	20
18	λ = 202 Вт/м·°С	600	136	25
19	c = 920 Дж/кг·°С	300	108,8	35
20	ρ = 2670 кг/м³	200	163,2	30
21		300	136	45
22		200	285,6	20
23	ЛАТУНЬ	400	128,2	25
24	λ = 85,5 Вт/м·°С	500	119,7	30
25	c = 378 Дж/кг·°С	600	156,7	35
26	ρ = 8600 кг/м³	300	136,8	45
27	ЧУГУН	400	141,7	50
28	λ = 63 Вт/м·°С	200	126	40
29	c = 504 Дж/кг·°С	500	113,4	35
30	ρ = 7220 кг/м³	600	147	30

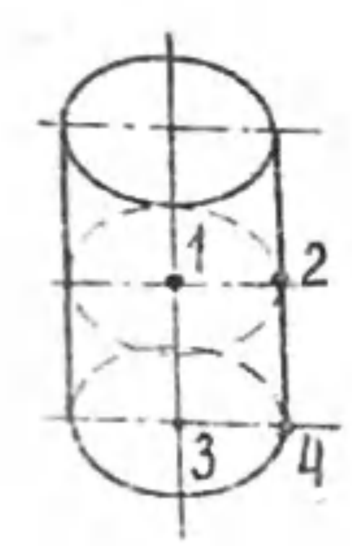


Рис. 6

ЗАДАЧА № 3

Цилиндр диаметром d, высотой h с начальной температурой 20°С помещен в печь с температурой среды 600°С. Коэффициент теплоотдачи в процессе нагрева цилиндра α = 150 Вт/м²·°С.

Рассчитать температуры t_1, t_2, t_3, t_4, а также воспринятую цилиндром теплоту (Q ,МДж) 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.
I	СТАЛЬ	2I2	363	36
2	λ = 45,4 Вт/м·°С	I82	333	24
3	ρ = 7900 кг/м^3	I69	303	I8
4	c = 462 Дж/кг·°С	242	424	24
5		272	484	30
6		I57	272	36
7	МЕДЬ	307	4I0	32
8	λ = 384 Вт/м·°С	205	307	40
9	ρ = 8800 кг/м^3	4I0	205	I5
I0	c = 38I Дж/кг·°С	5I2	6I4	28
II		6I4	5I2	25
I2	БРОНЗА	384	5I2	28
I3	λ = 64 Вт/м·°С	34I	469	25
I4	ρ = 8000 кг/м^3	427	427	30
I5	c = 38I Дж/кг·°С	299	597	35
I6		469	683	40
I7	ЧУГУН	294	378	35
I8	λ = 63 Вт/м·°С	252	336	40
I9	ρ = 7220 кг/м^3	235	294	57
20	c = 504 Дж/кг·°С	336	420	54
2I		378	462	52
22		420	504	30
23	АЛЮМИНИЙ	38I	490	I8
24	λ = 204 Вт/м·°С	435	435	I0
25	ρ = 2670 кг/м^3	326	38I	I5
26	c = 920 Дж/кг·°С	490	544	20
27	ЛАТУНЬ	228	296	25
28	λ = 85,5 Вт/м·°С	25I	3I9	40
29	ρ = 8600 кг/м^3	274	342	50
30	c = 378 Дж/кг·°С	3I9	399	55

Задача № 4-I

Плита из бронзы (λ = 64 Вт/м·°С, ρ = 8000 кг/м^3, c = 38I Дж/кг·°С) неограниченной протяженности толщиной 400 мм, имеющая начальную температуру 900°С, охлаждается в среде с $t_ж = 500 - 0,5\tau$, °С. Коэффициент теплоотдачи на поверхности плиты в процессе охлаждения $\alpha = 600 - 0,3\tau$ Вт/м^2·°С, τ - время в сек.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры в точках с координатами X = 0, 0,I, 0,2, и т.д. до X = I при τ = I0 мин после начала охлаждения.

Задача № 4-2

Плита из бронзы (λ = 64 Вт/м·°С ρ = 8000 кг/м^3, c = 38I Дж/кг·°С) неограниченной протяженности толщиной δ = 400 мм, имеет начальную температуру 20°С.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры в точках с координатами X=0,0,I, 0,2 и т.д. до X= I через I0 мин после идеального контакта поверхностей плиты с источниками постоянной температуры $t_I = t_{II}$ = 900°С.

Задача № 4-3

Решить задачу № 4-2 при условии, что поверхности плиты контактируют с источниками переменной температуры $t_I = t_{II} = 50 + I,5\tau$, °С.

Задача № 4-4

Плита из гидрита лития (λ = 5,5 Вт/м·°С, c = 5680 Дж/кг·°С, ρ = =702 кг/м^3) неограниченной протяженности толщиной I00 мм имеет начальную температуру 20°С.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры в точках с координатами X= 0, 0,I, 0,2 и т.д. до X = I через τ= 20 мин после идеального контакта верхней поверхности плиты с источником постоянной температуры t_I = 900°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 $t_I = I00 + 0,7\tau$, °С. τ - время в сек.

Задача № 4-6

Плита неограниченной протяженности с теплофизическими свойствами: $\lambda = 0{,}1$ Вт/м·°С, $c = 1400$ Дж/кг °С, $\rho = 1000$ кг/м^3 толщиной 50 мм имеет начальную температуру 10°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 $\tau = 15$ мин после идеального контакта верхней поверхности плиты с источником постоянной температуры $t_1 = 800$°С. Со стороны нижней поверхности плиты $t_ж = 40$°С, $\alpha = 290$ Вт/м^2·°С.

Задача № 4-7

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

Задача № 4-8

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

Задача № 4-9

Плита неограниченной протяженности с теплофизическими свойствами: $a = 1{,}85\cdot10^{-11}$м^2/с, $\lambda = 0{,}116$ Вт/м·°С толщиной 200 мм имеет начальную температуру 20°С.

Используя метод тепловых балансов, расчитать температуры через время $\tau = 15$ мин после начала прогрева верхней и нижней поверхностей плиты при следующих условиях: со стороны верхней поверхности $t_{ж_1} = 1000$°С, $\alpha_1 = 290$ Вт/м^2·°С, со стороны нижней поверхности $t_{ж_2} = 300$°С, $\alpha_2 = 2500$ Вт/м^2·°С.

Задача № 4-10

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

Задача № 4-11

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

нижней поверхности с источником переменной температуры $t_{11} = 50 + 0{,}5\tau$, °С, τ - время в сек.

Задача № 4-12

Решить задачу № 4-9 при условии идеального контакта верхней поверхности плиты с источником постоянной температуры $t_1 = 500$°С, нижней поверхности плиты с источником постоянной температуры $t_{11} = 200$°С.

Задача № 4-13

Решить задачу № 4-9 при следующих условиях теплообмена на поверхностях: со стороны верхней поверхности $t_{ж_1} = 1000$°С, $\alpha_1 = 290$ Вт/м^2·°С, со стороны нижней поверхности $t_{ж_2} = 30 + 0{,}5\tau$,°С, $\alpha_2 = 100 + 1{,}5\tau$ Вт/м^2·°С, τ - 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·°С, $c_1 = 565$ Дж/кг·°С, $\rho_1 = 4460$ кг/м^3) и нижним слоем толщиной $\delta_2 = 200$ мм ($\lambda_2 = 50$ Вт/м·°С, $c_2 = 460$ Дж/кг·°С, $\rho_2 = 7900$ кг/м^3) имеет начальную температуру 17°С.

Используя метод тепловых балансов, рассчитать температуры на верхней (t_1) и нижней поверхностях (t_{21}), а также на поверхности контакта слоев (t_{11}) через 10 мин после начала прогрева поверхностей при следующих условиях: со стороны верхней поверхности $t_{ж_1} = 1000$°С, $\alpha_1 = 100$ Вт/м^2·°С, со стороны нижней поверхности $t_{ж_2} = 500$°С, $\alpha_2 = 50$ Вт/м^2·°С.

Задача № 4-15

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником постоянной температуры $t_1 = 800$°С.

Задача № 4-16

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

Задача № 4-17

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

Задача № 4-18

Решить задачу № 4-14 при условии идеального контакта верхней поверхности с источником переменной температуры $t_1 = 50 + 1,1\tau$, $^\circ$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 $t_1 = 800^\circ$C и переменным коэффициентом теплоотдачи со стороны нижней поверхности $\alpha_2 = 20+0,8\tau$, Вт/м$^2\cdot{}^\circ$C, τ - время в сек.

Задача № 4-20

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

Задача № 4-21

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

Задача № 4-22

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

Задача № 4-23

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

Задача № 4-24

Решить задачу № 4-14 при следующих условиях теплообмена поверхностей: на верхней поверхности $t_{ж1} = 100+0,9\tau$, $^\circ$C, $\alpha_1 = 50+0,5\tau$, Вт/м$^2\cdot{}^\circ$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 $t_1 = 700^\circ$C, со стороны нижней поверхности $t_{ж2} = 50+0,5\tau$, $^\circ$C, $\alpha_2 = 20+0,8\tau$, Вт/м$^2\cdot{}^\circ$C.

Литература

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.