

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
21.03.01 «Нефтегазовое дело»
очной формы обучения*



Могилев 2025

УДК 536:621
ББК 22.317:34.05
Т35

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «27» декабря 2024 г.,
протокол № 7

Составители: канд. техн. наук, доц. В. П. Груша;
А. П. Гутев; К. Н. Баранов

Рецензент А. С. Федосенко

Изложены задачи, дан список учебной литературы по изучению курса «Термодинамика и теплопередача», направленной на закрепление теоретического материала курса, а также ознакомление студентов с методиками измерений и исследований теплофизических процессов, протекающих в производственных агрегатах.

Учебное издание

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч. -изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2025

Содержание

1 Практическое занятие № 1. Теплопроводность через плоскую стенку при стационарном режиме.....	4
2 Практическое занятие № 2. Теплопроводность в цилиндрической стенке при стационарном режиме.....	6
3 Практическое занятие № 3. Теплопроводность при нестационарном режиме.....	7
4 Практическое занятие № 4. Теплообмен излучением.....	8
5 Практическое занятие № 5. Конвективный теплообмен.....	9
6 Практическое занятие № 6. Теплообмен излучением, конвекцией и теплопроводностью.....	12
7 Практическое занятие № 7. Теплоотдача при свободном движении жидкости.....	14
8 Практическое занятие № 8. Теплообменные аппараты.....	19
Список литературы.....	22

1 Практическое занятие № 1. Теплопроводность через плоскую стенку при стационарном режиме

Количество теплоты, проходящее через изотермическую поверхность F в единицу времени, называется тепловым потоком Q , Вт = Дж/с.

Тепловой поток, проходящий через единицу площади, называют плотностью теплового потока $q = Q / F$, Вт/м².

Для твердого тела уравнение теплопроводности подчиняется закону Фурье: тепловой поток, передаваемый теплопроводностью, пропорционален градиенту температуры и площади сечения, перпендикулярной направлению теплового поток

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot \partial t / \partial n ,$$

или

$$q = -\lambda \cdot \partial t / \partial n \cdot n_o = -\lambda \cdot \text{grad} t .$$

На рисунке 1.1 представлена однородная плоская стенка.

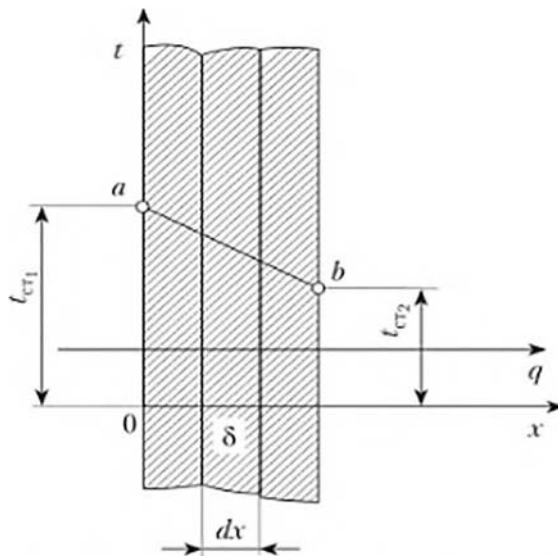


Рисунок 1.1 – Однородная плоская стенка. Температуры поверхностей стенки $a = t_{cm1}$ и $b = t_{cm2}$

Плотность теплового потока

$$q = -\lambda \cdot \partial t / \partial n = -\lambda \cdot \partial t / \partial x = -\lambda \cdot (t_{cm2} - t_{cm1}) / (x_{cm2} - x_{cm1}) ,$$

или

$$q = -\lambda \cdot (t_{cm2} - t_{cm1}) / (x_{cm2} - x_{cm1}) = -\lambda \cdot \Delta t / \Delta x .$$

Задача 1. Определить потерю теплоты через кирпичную стену цеха длиной 5 м, высотой 3 м и толщиной 250 мм, если на поверхностях стенки поддерживаются температуры $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_2 = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплопроводности кирпича $\lambda = 0,6\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$.

Решение

Согласно уравнению

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2) = \frac{0,6}{0,25}(20 - 30) = 120\text{ Вт/м}^2;$$

$$Q = q \cdot F = 120 \cdot 15 = 1800\text{ Вт.}$$

Задача 2. Определить значение коэффициента теплопроводности материала стенки ковша, если при толщине $\delta = 30\text{ мм}$ и температурном напоре $\Delta t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ плотность теплового потока $q = 100\text{ Вт/м}^2$.

Решение

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{\Delta t} = \frac{100 \cdot 0,03}{30} = 0,1\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}.$$

Задача 3. Определить плотность теплового потока через плоскую шамотную стенку толщиной $\delta = 0,5\text{ м}$ и найти действительное распределение температуры, если на наружных поверхностях температуры $t_1 = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_2 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и коэффициент теплопроводности шамота $\lambda = 1,0 \cdot (1 + 0,001 \cdot t)\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$.

Решение

Сначала вычислим среднюю температуру стенки t_{cp} :

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{1000 + 0}{2} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

По средней температуре t_{cp} определим среднее значение коэффициента теплопроводности λ_{cp} :

$$\lambda_{cp} = 1,0 \cdot (1 + 0,001 \cdot t_{cp}) = 1,0 \cdot (1 + 0,001 \cdot 500) = 1,5\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}.$$

Подставляя полученное значение λ_{cp} , получаем

$$q = \frac{\lambda_{cp}}{\delta} \cdot \Delta t = \frac{1,5}{0,5} \cdot 1000 = 3000\text{ Вт/м}^2.$$

2 Практическое занятие № 2. Теплопроводность в цилиндрической стенке при стационарном режиме

Рассмотрим стационарный процесс теплопроводности в цилиндрической стенке (трубе) длиной l с внутренним диаметром $d_1 = 2r_1$ и наружным диаметром $d_2 = 2r_2$ (рисунок 2.1).

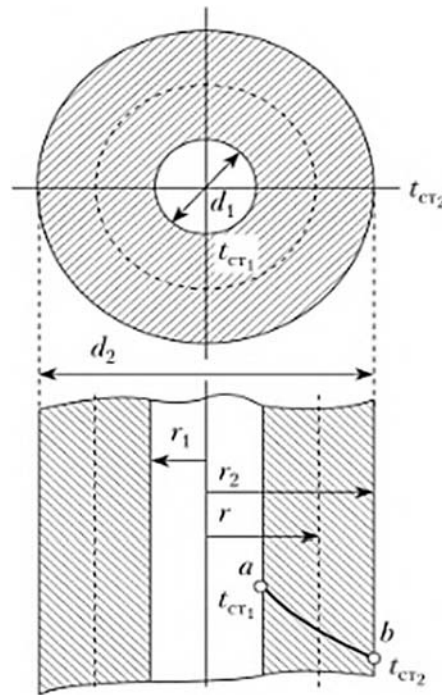


Рисунок 2.1 – Однослойная цилиндрическая стенка

Уравнение теплопроводности по закону Фурье в цилиндрических координатах:

$$Q = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot \partial t / \partial r ,$$

или

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \Delta t / \ln(d_2/d_1) ,$$

где Δt – температурный напор, $\Delta t = t_{cm1} - t_{cm2}$;

λ – коэффициент теплопроводности стенки.

Для цилиндрических поверхностей вводят понятие «тепловой поток единицы длины цилиндрической поверхности» (линейная плотность теплового потока), для которого расчетная формула

$$q \cdot l = Q / l = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \Delta t / \ln(d_2/d_1) .$$

Температура тела внутри стенки с координатой d_x

$$t_x = t_{cm1} - (t_{cm1} - t_{cm2}) \cdot \ln(d_x/d_1) / \ln(d_2/d_1).$$

Задача. Вычислить потерю теплоты с 1 м неизолированного трубопровода диаметром $d_1/d_2 = 150/165$ мм, проложенного на открытом воздухе, если внутри трубы протекает вода со средней температурой $t_{ж1} = 90$ °С и температура окружающего воздуха $t_{ж2} = -15$ °С. Коэффициент теплопроводности материала трубы $\lambda = 50$ Вт/(м·°С). Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы $\alpha_1 = 1000$ Вт/(м²·°С) и от трубы к окружающему воздуху $\alpha_2 = 12$ Вт/(м²·°С). Определить также температуры на внутренней и внешней поверхностях трубы.

3 Практическое занятие № 3. Теплопроводность при нестационарном режиме

Задача. Стальная цилиндрическая заготовка с диаметром $D = 140$ мм вставлена в печь, в которой поддерживается постоянная температура $t_{окр} = 860$ °С; начальная температура заготовки $t_0 = 27$ °С. Физические свойства стали: коэффициент теплопроводности $\lambda = 38$ Вт/(м·град); средняя теплоемкость $c = 0,703$ кДж/(кг·град); плотность $\rho = 7850$ кг/м³. Среднее за время нагрева значение коэффициента теплопередачи можно определить по эмпирической формуле $\alpha = 0,105(T_{окр}/100)^3 + 12$ Вт/(м²·град). Определить продолжительность нагрева до достижения на поверхности заготовки температуры 850 °С.

Решение

Находим коэффициент температуропроводности:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{38}{7850 \cdot 703} = 7 \cdot 10^{-6}.$$

Коэффициент теплоотдачи при $T_{окр} = 860 + 273 = 1133$ К

$$\alpha = 0,105 \cdot (1133/100)^3 + 12 = 165 \text{ Вт/(м}^2\text{·град)}.$$

Критерий Био для цилиндра

$$Bi = \alpha \cdot R / \lambda = 165 \cdot 0,07 / 38 = 0,3.$$

Температурный критерий для поверхности цилиндра

$$\theta = \frac{t_{окр} - t}{t_{окр} - t_0} = \frac{860 - 850}{860 - 27} = 0,012.$$

По найденным значениям критериев Bi и θ определяем критерий Фурье:

$$Fo = \alpha\tau/R^2 = 7,8,$$

откуда находим время нагрева:

$$\tau = Fo \cdot (R^2/\alpha) = 7,8 \cdot (0,07^2/7 \cdot 10^{-6}) = 5470 \text{ с} = 1,52 \text{ ч} = 1 \text{ ч } 31 \text{ мин.}$$

4 Практическое занятие № 4. Теплообмен излучением

Лучистая энергия возникает за счет энергии других видов в результате сложных молекулярных и внутриатомных процессов. Природа всех лучей одинакова. Они представляют собой распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны.

Источником теплового излучения является внутренняя энергия нагретого тела. Количество лучистой энергии в основном зависит от физических свойств и температуры излучающего тела.

Задача. Определить потерю теплоты путем излучения с поверхности стальной трубы диаметром $d = 70$ мм и длиной $l = 3$ м при температуре поверхности $t_1 = 227^\circ\text{C}$, если эта труба находится в большом кирпичном помещении, температура стенок которого $t_2 = 27^\circ\text{C}$; в кирпичном канале, площадь которого равна $0,3 \times 0,3$ м при температуре стенок $t_2 = 27^\circ\text{C}$.

Решение

Согласно условию $F_1 \ll F_2$, поэтому $\varepsilon_n = \varepsilon_1$.

Далее находим, что для окисленной стали $\varepsilon_1 = 0,79$. Тогда имеем

$$\begin{aligned} Q_{12} &= \varepsilon_1 \cdot c_0 \cdot F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \\ &= 0,79 \cdot 5,73 \cdot 14 \cdot 0,073 \cdot (5,0^4 - 3,0^4) = 0,79 \cdot 5,7 \cdot 0,66 \cdot 544 = 1620 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

$$F_1 = 0,66 \text{ м}^2, F_2 = 3,6 \text{ м}^2 \text{ и } F_1 / F_2 = 0,182; \text{ для кирпича } \varepsilon_2 = 0,93.$$

Согласно этому имеем

$$\varepsilon_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{F_1}{F_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = \frac{1}{1,27 + 0,182 \cdot 0,075} = \frac{1}{1,284} = 0,78.$$

Подставляя эти значения в уравнение, получаем

$$Q_{12} = 0,78 \cdot 5,7 \cdot 0,66 \cdot 544 = 1595 \text{ Вт,}$$

или на единицу трубы

$$q_l = \frac{Q_{12}}{l} = \frac{1595}{3} = 532 \text{ Вт/м.}$$

5 Практическое занятие № 5. Конвективный теплообмен

Конвективным теплообменом называется одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью.

В инженерных расчетах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела. Этот процесс конвективного теплообмена называют конвективной теплоотдачей или просто теплоотдачей.

Задача 1. Плоская пластина длиной $l = 1$ м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха $\omega_0 = 80$ м/с и $t_0 = 10$ °С. Перед пластиной установлена турбулизирующая решетка, вследствие чего движение в пограничном слое на всей длине пластины турбулентное. Вычислить среднее значение коэффициента теплоотдачи с поверхности пластины и значение местного коэффициента теплоотдачи на задней кромке, а также толщину гидродинамического пограничного слоя на задней кромке пластины.

Решение

При температуре набегающего потока $t_0 = 10$ °С физические свойства воздуха $\nu = 14,16 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 2,51 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·°С).

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega_0 \cdot l_0}{\nu} = \frac{80 \cdot 1,0}{14,16 \cdot 10^{-6}} = 5,65 \cdot 10^6 < 5 \cdot 10^5.$$

Режим движения в пограничном слое на пластине турбулентный.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи при обтекании пластины воздухом для турбулентного пограничного слоя можно вычислить по формуле

$$Nu = 0,032 \cdot Re^{0,8}.$$

Подставив полученное значение числа Рейнольдса в эту формулу, получим

$$Nu = 0,032 \cdot (5,65 \cdot 10^6)^{0,8} = 8050.$$

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{l_0} = 8050 \cdot \frac{2,51 \cdot 10^{-2}}{1,0} = 202 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Для вычисления местного коэффициента теплоотдачи при обтекании пластины воздухом и турбулентном пограничном слое можно воспользоваться следующей формулой:

$$Nu_x = 0,0255 \cdot Re_x^{0,8},$$

где $Nu_x = \alpha_x \cdot x / \lambda$;

$$Re_x = \omega_0 \cdot x / \nu.$$

Значение местного коэффициента теплоотдачи на задней кромке пластины найдем, положив $x = l_0$; тогда $Re_x = 5,65 \cdot 10^6$, $Nu_x = 0,255 \cdot (5,65 \cdot 10^6)^{0,8} = 6280$ и

$$\alpha_{x=l_0} = Nu_{x=l_0} \cdot \frac{\lambda}{l_0} = 6280 \cdot \frac{2,51 \cdot 10^{-2}}{1,0} = 157,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Местную толщину турбулентного гидродинамического пограничного слоя можно вычислить по формуле

$$\delta_T = \frac{0,37 x}{\sqrt[5]{Re_x}}.$$

Подставив значение известных величин, получаем при $x = l_0$

$$\delta_T = \frac{0,37 \cdot 1,0}{\sqrt[5]{5,65 \cdot 10^6}} = 0,0165 \text{ м}.$$

Задача 2. Определить средний коэффициент теплоотдачи α и полную теплоотдачу для плоской пластины шириной $b = 0,5$ м и длиной $l = 0,72$ м, обдуваемой воздухом со скоростью $W = 30$ м/с, если температура пластины $t_w = 100$ °С и температура воздуха $t_f = 20$ °С. Параметры воздуха при температуре 20 °С:

- коэффициент температуропроводности $\alpha_f = 21,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с;
- коэффициент теплопроводности $\lambda_f = 0,0261$ Вт/(м·град);
- коэффициент кинематической вязкости $\nu_f = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Решение

Определяем значение критерия Рейнольдса для пластины при $x = l$ (индекс f означает, что в качестве определяющей температуры берется температура набегающего потока, т. е. $t_f = 20$ °С):

$$Re_{f,l} = \frac{\omega \cdot l}{\nu_f} = \frac{30 \cdot 0,72}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 1,43 \cdot 10^6.$$

Значение критерия $Re_f = 1,43 \cdot 10^6$ соответствует значению критерия $Re_f = 4 \cdot 10^6$ в режиме перехода ламинарного течения в турбулентное.

Считая, что на пластине развивается режим турбулентного движения, будем иметь

$$\overline{Nu}_{f,l} = 0,037 \cdot Re_{f,l}^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}.$$

Значение критерия Прандтля для воздуха при температуре 20 °С

$$Pr_f = \frac{\nu_f}{\alpha_f} = \frac{15,06 \cdot 10^{-6}}{21,4 \cdot 10^{-6}} = 0,703.$$

Параметры воздуха при температуре 100 °С:

– коэффициент температуропроводности $\alpha_w = 33,64 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

– коэффициент кинематической вязкости $\nu_w = 23,13 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Значение критерия Прандтля для воздуха при температуре 100 °С

$$Pr_w = \frac{\nu_w}{\alpha_w} = \frac{23,13 \cdot 10^{-6}}{33,64 \cdot 10^{-6}} = 0,688.$$

Тогда

$$\overline{Nu}_{f,l} = 0,037 \cdot (1,43 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot (0,703)^{0,43} \cdot \left(\frac{0,703}{0,688} \right)^{0,25} = 1316,9.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\overline{\alpha}_{f,l} = \overline{Nu}_{f,l} \cdot \frac{\lambda}{l} = 1316,9 \cdot \frac{0,0261}{0,72} = 47,74 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}.$$

Полная теплоотдача будет равна:

$$Q = \overline{\alpha}_{f,l} \cdot F \cdot (t_w - t_f) = 47,74 \cdot 0,5 \cdot 0,72 \cdot (100 - 20) = 1375 \text{ Вт}.$$

6 Практическое занятие № 6. Теплообмен излучением, конвекцией и теплопроводностью

В производственных агрегатах тепло передается чаще всего одновременно лучеиспусканием, конвекцией и теплопроводностью. Точнее лучеиспускание, конвекция и теплопроводность являются лишь частными составляющими общего процесса теплопередачи. Роль каждой из них может быть различной. Возьмем часто встречающийся случай сложной теплопередачи от движущихся продуктов сгорания (дымовых газов) к стенке. Тепло от газов, температура которых t_1 передается поверхности с температурой t_c путем конвекции и лучеиспускания трехатомных газов CO_2 , O_2 и H_2O .

Конвективную теплоотдачу можно рассчитать по формуле

$$q_K = \alpha_K \cdot (t_G - t_C).$$

Лучистую теплоотдачу определяют по формуле

$$q_L = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C}{100} \right)^4 \right].$$

Складывая этих два количества тепла, получим уравнение

$$q = q_K + q_L = \alpha_K \cdot (t_G - t_C) + \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C}{100} \right)^4 \right].$$

Если преобладает конвективный теплообмен, то целесообразно уравнение привести к виду

$$q = \left\{ \alpha_K + \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C}{100} \right)^4}{t_G - t_C} \right] \right\} \cdot (t_G - t_C).$$

Часто в расчетах при сложном теплообмене пользуются суммарным коэффициентом теплоотдачи, представляющим собой сумму коэффициентов конвективной теплоотдачи α_L , тогда

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_L.$$

В этом случае формула для теплового потока имеет вид

$$q = (\alpha_K + \alpha_L) \cdot (t_G - t_C) = \alpha \cdot (t_G - t_C).$$

Значение α_l находят по формуле

$$\alpha_l = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot B,$$

где B – температурный коэффициент,

$$B = \frac{\left(\frac{T_G}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_C}{100}\right)^4}{t_G - t_C}.$$

Задача 1. Между двумя параллельно расположенными пластинами (абсолютно черными) происходит теплообмен излучением и теплопроводностью. Температура пластин T_1 , К и T_2 , К, расстояние между ними δ , м, теплопроводность воздуха λ , Вт/(м·К). Определить плотность теплового потока от горячей пластины к холодной согласно варианту (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Варианты исходных данных

Вариант	T_1 , К	T_2 , К	δ , м	λ , Вт/(м·град)
1	800	400	0,2	0,02
2	900	300	0,3	0,015
3	1000	400	0,4	0,1
4	1100	450	0,1	0,03
5	1200	500	0,05	0,04
6	1300	550	0,5	0,05
7	1400	600	0,6	0,06
8	1500	650	0,15	0,07
9	1600	700	0,1	0,05
0	1700	750	0,2	0,04

Задача 2. Определить плотность теплового потока излучением и конвекцией между двумя горизонтальными пластинами, расположенными в воздухе на расстоянии δ друг от друга, согласно варианту (таблица 6.2). Температуры поверхности пластин t_1 и t_2 , °С. Степени черноты ε_1 , ε_2 соответственно.

Таблица 6.2 – Варианты исходных данных

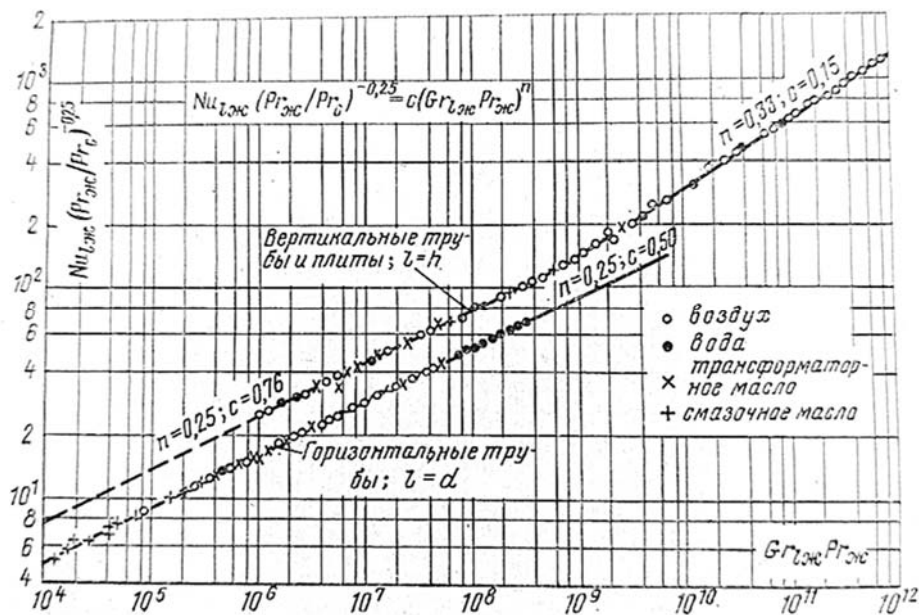
Вариант	δ , м	t_1 , °С	t_2 , °С	ε_1	ε_2
1	0,2	500	100	0,85	0,8
2	0,1	600	150	0,82	0,8
3	0,04	700	300	0,8	0,8
4	0,05	800	200	0,78	0,8
5	0,01	900	400	0,75	0,8
6	0,05	1000	700	0,7	0,8
7	0,02	1100	400	0,65	0,8
8	0,06	400	20	0,6	0,8
9	0,05	1200	500	0,5	0,8
0	0,04	500	100	0,6	0,8

7 Практическое занятие № 7. Теплоотдача при свободном движении жидкости

На основании экспериментальных исследований конвективного теплообмена между различными телами и различными жидкостями в условиях свободного движения для средних значений коэффициента теплоотдачи получены следующие уравнения подобия.

Для горизонтальных труб диаметром d при $10^3 < (Gr_{c,d} \cdot Pr_c) < 10^8$ (ламинарный режим) (рисунок 7.1)

$$Nu_{c,d} = 0,50 \cdot (Gr_{c,d} \cdot Pr_c)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_{\Pi}} \right)^{0,25}.$$



1 — для вертикальных труб и плит; 2 — для горизонтальных труб

Рисунок 7.1 — Теплоотдача при свободном движении различных жидкостей

Для вертикальных поверхностей (трубы, пластины):

– при $10^3 < (Gr_{c,h} \cdot Pr_c) < 10^9$ (ламинарный режим)

$$Nu_{c,h} = 0,76 \cdot (Gr_{c,h} \cdot Pr_c)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_{\Pi}} \right)^{0,25};$$

– при $(Gr_{c,h} \cdot Pr_c) > 10^9$ (турбулентный режим)

$$Nu_{c,h} = 0,15 \cdot (Gr_{c,h} \cdot Pr_c)^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_{\Pi}} \right)^{0,25}.$$

В этих уравнениях в качестве определяющей температуры принята температура окружающей среды t_c . Определяющим геометрическим размером для горизонтальных труб принят диаметр d , для вертикальных поверхностей – высота h . Индексы, приведенные у критериальных чисел, уточняют определяющие величины.

Анализ уравнений подобия показывает, что при свободном движении интенсивность теплоотдачи определяется интенсивностью свободного движения – Gr и физическими свойствами среды – Pr .

Сомножитель $(Pr_c/Pr_{\Pi})^{0,25}$ играет роль поправочного коэффициента, который учитывает направление теплового потока (нагревание или охлаждение). Опытами установлено, что при нагревании капельной жидкости интенсивность теплоотдачи выше, чем при ее охлаждении. Для учета этого обстоятельства и понадобилось ввести в уравнение подобия указанный сомножитель. В условиях нагревания $(Pr_c/Pr_{\Pi})^{0,25} > 1$, а при охлаждении – $(Pr_c/Pr_{\Pi})^{0,25} < 1$, поэтому величина α , полученная из уравнения подобия в процессе нагревания капельной жидкости, будет иметь большее значение, чем при охлаждении, что соответствует действительности.

Для газов число Прандтля незначительно зависит от температуры, поэтому $(Pr_c/Pr_{\Pi})^{0,25} = 1$ и все приведенные расчетные формулы упрощаются.

Задача 1. Определить количество теплоты, передаваемой путем конвекции за 1 ч вертикальной трубой диаметром $d = 50$ мм и высотой $h = 4$ м, если температура поверхности стенки $t_n = 60$ °С, а температура воздуха $t_c = 20$ °С.

Решение

При $t_c = 20$ °С $\lambda_c = 0,0259$ Вт/(м·°С); $\nu_c = 15,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $Pr_c = 0,7$; $Pr_c/Pr_{\Pi} = 1$. При этих данных число Грасгофа равно

$$Gr_{c,h} = \frac{\beta \cdot g \cdot h^3 \cdot \Delta t}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 4^3 \cdot (60 - 20) \cdot 10^{12}}{293 \cdot 15,0^2} = 0,38 \cdot 10^{12}.$$

При полученном значении $(Gr_{c,h} \cdot Pr_c)$ режим будет турбулентным, следовательно, для расчета надо воспользоваться уравнением подобия:

$$Nu_{c,h} = 0,15 \cdot (Gr_{c,h} \cdot Pr_c)^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_{\Pi}} \right)^{0,25} = 0,15 \cdot (0,266 \cdot 10^{12})^{0,33} = 885.$$

Тогда

$$\alpha = \frac{Nu_{c,h} \cdot \lambda_c}{h} = \frac{885 \cdot 0,0259}{4} = 5,73 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Искомое количество теплоты

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_n - t_c) = 5,73 \cdot 3,14 \cdot 0,05 \cdot 4 \cdot 40 \cdot 3600 = 518 \text{ кДж}.$$

Задача 2. Как изменится теплоотдача, если трубу расположить горизонтально? Все прочие условия такие же, как и в предыдущем примере.

Решение

Имеем

$$Gr_{c,d} = \frac{\beta g h^3 \Delta t}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,05^3 \cdot (60 - 20) \cdot 10^{12}}{293 \cdot 15,0^2} = 7,45 \cdot 10^5;$$

$$Gr_{c,d} \cdot Pr_c = 7,45 \cdot 10^5 \cdot 0,7 = 5,21 \cdot 10^5.$$

По формуле определим

$$Nu_{c,d} = 0,50 \cdot (Gr_{c,d} \cdot Pr_c)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_{\Pi}} \right)^{0,25} = 0,50 \cdot (5,21 \cdot 10^5)^{0,25} = 13,4.$$

Тогда

$$\alpha = \frac{Nu_{c,d} \lambda_c}{d} = \frac{13,4 \cdot 0,0259}{0,05} = 6,95 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Количество переданной теплоты будет равно

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_n - t_c) = 6,95 \cdot 3,14 \cdot 0,05 \cdot 4 \cdot 40 \cdot 3600 = 628 \text{ кДж}.$$

Таким образом, при замене вертикального расположения трубы горизонтальным теплоотдача возросла на 21 %, т. к. $((628/518) \cdot 100 = 121 \%)$.

Задача 3. Определить потери теплоты за 1 ч через оконный проем размерами $0,8 \times 1,4$ м, если расстояние между рамами $\delta = 0,12$ м, температура нагретого стекла $t_{n1} = 16$ °С, а холодного – $t_{n2} = -10$ °С.

Решение

При расчете прослоек в качестве определяющей температуры принимается средняя температура среды

$$t_c = \frac{t_{n1} + t_{n2}}{2} = \frac{16 - 10}{2} = 3 \text{ °С.}$$

Находим

$$\lambda_c = 0,025 \text{ Вт/(м·°С); } \nu_c = 13,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с; } Pr_c = 0,7;$$

$$Gr_{c,\delta} = \frac{\beta g h^3 \Delta t}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,12^3 \cdot (16 - (-10)) \cdot 10^{12}}{276 \cdot 13,5^2} = 8,75 \cdot 10^6;$$

$$Gr_{c,\delta} \cdot Pr_c = 8,75 \cdot 10^6 \cdot 0,7 = 6,1 \cdot 10^6.$$

Коэффициент конвекции найдем по формуле

$$\varepsilon_K = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)_{c,\delta}^{0,25} = 0,18 \cdot (6,1 \cdot 10^6)^{0,25} = 9,0.$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{ЭК} = \varepsilon_K \cdot \lambda = 9,0 \cdot 0,025 = 0,222 \text{ Вт/(м·°С).}$$

Искомое количество теплоты

$$Q = \frac{\lambda_{ЭК}}{\delta} \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau = \frac{0,222}{0,12} \cdot 0,8 \cdot 1,4 \cdot 3600 \cdot 26 = 193 \text{ кДж.}$$

Задача 4. Определить коэффициент теплоотдачи от вертикальной плиты высотой $H = 2$ м к окружающему спокойному воздуху, если известно, что температура поверхности плиты $t_c = 100$ °С, температура окружающего воздуха вдали от поверхности $t_{жс} = 20$ °С.

Решение

Теплоотдачу при естественной конвекции у поверхности вертикальной плиты можно определить по формуле

$$Nu_{жс} = C \cdot (Gr \cdot Pr)_{жс}^n \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25},$$

где за определяющий размер принимается высота плиты H .

При $t_{жс} = 20$ °С физические свойства воздуха следующие:

$$\lambda_{жс} = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}; \nu_{жс} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$Pr_{жс} = 0,703; \beta_{жс} = \frac{1}{t_{жс} + 273} = \frac{1}{293} \text{ К}^{-1}.$$

При этих условиях значение комплекса

$$(Gr \cdot Pr)_{жс} = g \cdot \beta \cdot \frac{\Delta t \cdot H^3}{\nu_{жс}^2} \cdot Pr_{жс} = 9,81 \cdot \frac{1}{293} \cdot \frac{80 \cdot 2^3 \cdot 10^{12}}{15,06^2} \cdot 0,703 = 6,64 \cdot 10^{10}.$$

При полученном значении $(Gr \cdot Pr)_{жс}$ находим $C = 0,15$; $n = 1,3$, тогда

$$Nu_{жс} = 0,15 (6,64 \cdot 10^{10})^{\frac{1}{3}} = 610;$$

$$\alpha = Nu_{жс} \cdot \frac{\lambda_{жс}}{H} = 610 \cdot \frac{2,59 \cdot 10^{-2}}{2} = 7,92 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}.$$

Задача 5. Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности и плотность теплового потока q , Вт/м², через вертикальную щель толщиной $\delta = 20$ мм, заполненную воздухом. Температура горячей поверхности $t_{c1} = 200$ °С и холодной $t_{c2} = 80$ °С.

Решение

Эквивалентный коэффициент теплопроводности может быть вычислен по формуле

$$\lambda_{э} = \lambda \cdot \epsilon_{к},$$

где λ – действительный коэффициент теплопроводности жидкости;

ε_k – коэффициент конвекции, являющийся функцией $(Gr \cdot Pr)$, может быть приближенно вычислен по формуле

$$\varepsilon_k = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)_{C.F.}^{0,25}.$$

Здесь все физические параметры выбираются при определяющей температуре $t_{C.F.} = 0,5(t_{c1} + t_{c2})$.

За определяющий размер принимается ширина щели δ , за расчетную разность температур – величина $\Delta t = t_{c1} - t_{c2}$.

В рассматриваемом случае $t_{C.F.} = 0,5 \cdot (200 + 80) = 140$ °С. При этой температуре $\nu_{C.F.} = 27,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda_{C.F.} = 0,0349$ Вт/(м·°С); $Pr_{C.F.} = 0,684$;

$$\beta_{C.F.} = \frac{1}{t_{C.F.} + 273} = \frac{1}{413} \text{ К}^{-1}.$$

Вычисляем

$$(Gr \cdot Pr)_{C.F.} = g \cdot \beta_{C.F.} \cdot \frac{(t_{c1} - t_{c2}) \cdot \delta^3}{\nu^2} \cdot Pr_{C.F.} = 9,81 \cdot \frac{120 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^3}{413 \cdot (27,8 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0,684 = 2,02 \cdot 10^4.$$

Коэффициент конвекции

$$\varepsilon_k = 0,18 \cdot (2,02 \cdot 10^4)^{0,25} = 2,14,$$

тогда

$$\lambda_y = 3,49 \cdot 10^{-2} \cdot 2,14 = 7,47 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}.$$

Плотность теплового потока через воздушную прослойку

$$q = \frac{\lambda_y}{\delta} \cdot (t_{c1} - t_{c2}) = \frac{7,47 \cdot 10^{-2}}{0,02} \cdot 120 = 448 \text{ Вт/м}^2.$$

8 Практическое занятие № 8. Теплообменные аппараты

Целью теплового расчета является определение поверхности теплообмена, а если последняя известна, то целью расчета является определение конечных температур рабочих жидкостей. Основными расчетными уравнениями теплообмена при стационарном режиме являются уравнение теплопередачи и уравнение теплового баланса. Уравнение теплопередачи

$$Q = k \cdot F \cdot (t_1 - t_2),$$

где Q – тепловой поток, Вт;

k – средний коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·град);

F – поверхность теплообмена в аппарате, м²;

t_1, t_2 – температура горячего и холодного теплоносителей соответственно.

Уравнение теплового баланса при условии отсутствия тепловых потерь и фазовых переходов

$$Q = m_1 \cdot \Delta t_1 = m_2 \cdot \Delta t_2,$$

или

$$Q = V_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (t''^1 - t'^1) = V_2 \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (t''^2 - t'^2),$$

где $V_1 \rho_1, V_2 \rho_2$ – массовые расходы теплоносителей, кг/с;

c_{p1}, c_{p2} – средние массовые теплоемкости жидкостей в интервале температур от t'^1 до t'^2 ;

t'^1, t'^2 – температуры жидкостей при входе в аппарат;

t''^1, t''^2 – температуры жидкостей при выходе из аппарата.

Задача. Определить поверхность нагрева прямоточного и противоточного воздухоподогревателя, обогреваемого дымовыми газами. Температура воздуха на входе $t'_g = 30$ °С и на выходе $t''_g = 200$ °С.

Температура дымовых газов до воздухоподогревателя и после него соответственно $t'_g = 510$ °С и $t''_g = 320$ °С.

Давление воздуха $p = 0,1$ МПа. Количество подогреваемого воздуха $V_g = 1,67$ м³/с = 6000 м³/ч; коэффициент теплопередачи от газов к воздуху $k = 15$ Вт/(м²·град).

Решение

Количество тепла, передаваемое от газов к воздуху:

$$Q_B = V_B \cdot C'_B \cdot (t''_B - t'_B) = 1,67 \cdot 1,323 \cdot 10^3 \cdot (200 - 30) = 375 \text{ кВт},$$

где C'_B – средняя объемная изобарная теплоемкость воздуха, $C'_B = 1,323$ кДж/(м³·град).

Среднюю логарифмическую разность температур при прямотоке найдем по формуле

$$\Delta t_{\rightarrow} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mathcal{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mathcal{M}}}} = \frac{(510 - 30) - (320 - 200)}{2,31 \cdot \ln \frac{510 - 30}{320 - 200}} = 260 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Необходимая поверхность нагрева воздухоподогревателя

$$F = \frac{Q_B}{k \cdot \Delta t_{\rightarrow}} = \frac{375000}{15 \cdot 260} = 96,2 \text{ м}^2.$$

Средняя логарифмическая разность при противотоке

$$\Delta t_{\rightarrow} = \frac{(510 - 200) - (320 - 30)}{2,31 \cdot \ln \frac{510 - 200}{320 - 30}} = 297 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Необходимая поверхность нагрева воздухоподогревателя

$$F_{\rightarrow} = \frac{375000}{15 \cdot 297} = 84,2 \text{ м}^2.$$

Отсюда видно, что при противотоке требуется при прочих равных условиях меньшая поверхность нагрева.

Список литературы

- 1 **Семенов, Ю. П.** Теплотехника / Ю. П. Семенов, А. Б. Левин. – 2-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 234 с.
- 2 **Кудинов, В. А.** Теплотехника / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – М.: КУРС; ИНФРА-М, 2019. – 268 с.
- 3 **Видин, Ю. В.** Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен / Ю. В. Видин, Р. В. Казаков, В. В. Колосов. – Красноярск: СФУ, 2015. – 215 с.
- 4 **Семенов, Ю. П.** Основы тепломассообмена / Ю. П. Семенов. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 321 с.
- 5 Техническая термодинамика и теплотехника / Под ред. А. А. Захаровой. – 2-е изд., испр. – М.: Академия, 2008. – 460 с.
- 6 **Кудинов, В. А.** Техническая термодинамика / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2007. – 218 с.
- 7 **Металлургическая теплотехника: учебник: в 2 т. / В. А. Кривандин, И. Н. Неведомская, В. В. Кобахидзе, В. В. Белоусов.** – М.: Металлургия, 1986. – Т. 2. – 592 с.