

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

# ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов специальности 1-36 07 02  
«Производство изделий на основе трехмерных технологий»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2022

УДК 536:621  
ББК 22.317:34.05  
Т35

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «09» марта 2022 г., протокол № 8

Составитель канд. техн. наук, доц. В. П. Груша

Рецензент канд. техн. наук, доц. Д. М. Свирепа

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

Учебно-методическое издание

## ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В МАШИНОСТРОЕНИИ

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	Т. А. Рыжикова
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать . Формат 60 × 84 /16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная . Усл. печ. л. . Уч. -изд. л. . Тираж 36 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, 2022

## 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.....	11
7 Практическое занятие № 7. Теплоотдача при свободном движении жидкости.....	13
8 Практическое занятие № 8. Теплообменные аппараты.....	15
Список литературы.....	18

## 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/м<sup>2</sup>.

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

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

или

$$q = -\lambda \cdot \partial t / \partial n \cdot n_0 = -\lambda \cdot \text{grad} t.$$

На рисунке 1.1 представлена однородная плоская стенка.

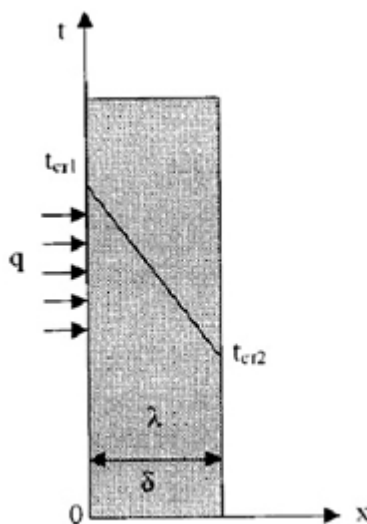


Рисунок 1.1 – Однородная плоская стенка. Температуры поверхностей стенки  $t_{cm1}$  и  $t_{cm2}$

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 стенку длиной 5 м, высотой 3 м и толщиной 250 мм, если на поверхностях стенки поддерживаются температуры  $t_1 = 20$  °С и  $t_2 = -30$  °С. Коэффициент теплопроводности кирпича  $\lambda = 0,6$  Вт/(м·°С).

*Решение*

Согласно уравнению

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

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

**Задача 2.** Определить значение коэффициента теплопроводности материала стенки, если при толщине  $\delta = 30$  мм и температурном напоре  $\Delta t = 30$  °С плотность теплового потока  $q = 100$  Вт/м<sup>2</sup>.

*Решение*

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

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

*Решение*

Сначала вычислим среднюю температуру стенки  $t_{cp}$ :

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{1000 + 0}{2} = 500 \text{ °С.}$$

По средней температуре  $t_{cp}$  определим среднее значение коэффициента теплопроводности  $\lambda_{cp}$ :

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

Подставляя полученное значение  $\lambda_{cp}$ , получаем

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

## 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).

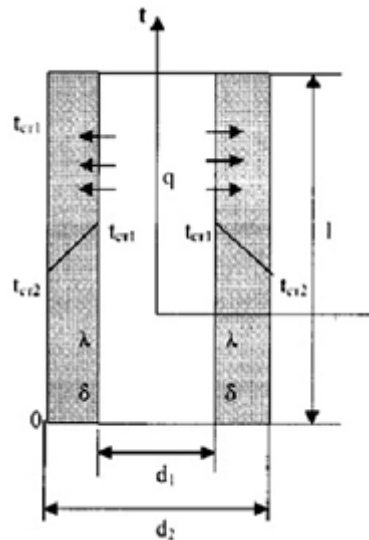


Рисунок 2.1 – Однослойная цилиндрическая стенка

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

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности стенки.

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

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

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/(м<sup>2</sup>·°С) и от трубы к окружающему воздуху  $\alpha_2 = 12$  Вт/(м<sup>2</sup>·°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/м<sup>3</sup>. Среднее за время нагрева значение коэффициента теплопередачи можно определить по эмпирической формуле  $\alpha = 0,105(T_{окр}/100)^3 + 12$  Вт/(м<sup>2</sup>·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

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

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  $\theta$  определяем критерий Фурье:

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

откуда находим время нагрева:

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

#### 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  $t_1 = 227$  °С, если эта труба находится в большом кирпичном помещении, температура стенок которого  $t_2 = 27$  °С; в кирпичном канале, площадь которого равна  $0,3 \times 0,3$  м при температуре стенок  $t_2 = 27$  °С.

*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

$$Q_{12} = \varepsilon_1 c_0 F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 0,79 \cdot 5,7 \cdot 3,14 \cdot 0,07 \cdot 3 (5,0^4 - 3,0^4) = 0,79 \cdot 5,7 \cdot 0,66 \cdot 544 = 1620 \text{ Вт.}$$

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

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  $\nu = 14,16 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 2,51 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м · °С).

Число Рейнольдса

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

Режим движения в пограничном слое на пластине турбулентный.

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

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

Подставив полученное значение числа Рейнольдса в эту формулу, получим

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

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

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

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

где  $Nu_x = \alpha_x x / \lambda$ ;

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

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

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

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  $\alpha$  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  $\alpha_f = 21,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;
- коэффициент теплопроводности  $\lambda_f = 0,0261$  Вт/м·град;
- коэффициент кинематической вязкости  $\nu_f = 15,06 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/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  $\alpha_w = 33,64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

– коэффициент кинематической вязкости  $\nu_w = 23,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

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:

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

## **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  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

Конвективную теплоотдачу можно рассчитать по формуле

$$q_K = \alpha_K (t_\Gamma - t_C).$$

Лучистую теплоотдачу определяют по формуле

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

Складывая этих два количества тепла, получим уравнение

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

Если преобладает конвективный теплообмен, то целесообразно уравнение привести к виду

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

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

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

В этом случае формула для теплового потока имеет вид:

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

Значение  $\alpha_L$  находят по формуле

$$\alpha_L = \varepsilon_{np} C_0 B,$$

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  $\delta$ , м, теплопроводность воздуха  $\lambda$ , Вт/(м·К). Определить плотность теплового потока от горячей пластины к холодной согласно варианту (таблица 6.1)

Таблица 6.1

Вариант	$T_1$ , К	$T_2$ , К	$\delta$ , м	$\lambda$ , 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  $\delta$  друг от друга, согласно варианту (таблица 6.2). Температуры поверхности пластин  $t_1$  и  $t_2$ , °С. Степени черноты  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  соответственно.

Таблица 6.2

Вариант	$\delta$ , м	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$
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

**Задача 1.** 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

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

где за определяющий размер принимается высота плиты  $H$ .

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

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

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

При этих условиях значение комплекса

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

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

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

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

**Задача 2.** Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности и плотность теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, 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

$$\lambda_{э} = \lambda \varepsilon_{к},$$

где  $\lambda$  – действительный коэффициент теплопроводности жидкости;

$\varepsilon_{\kappa}$  – коэффициент конвекции, являющийся функцией  $GrPr$ , может быть приближенно вычислен по формуле

$$\varepsilon_{\kappa} = 0,18(Gr Pr)_{C.G.}^{0,25}.$$

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

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

В рассматриваемом случае  $t_{C.G.} = 0,5(200 + 80) = 140$  °С. При этой температуре  $\nu_{C.G.} = 27,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_{C.G.} = 0,0349$  Вт/(м·°С);  $Pr_{C.G.} = 0,684$ ;

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

Вычисляем

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

Коэффициент конвекции

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

тогда

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

Плотность теплового потока через воздушную прослойку

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

## 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/(м<sup>2</sup> · град);

$F$  – поверхность теплообмена в аппарате, м<sup>2</sup>;

$t_1, t_2$  – 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

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

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  $t'^2$ ;

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

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

**Задача.** Определить поверхность нагрева прямоточного и противоточного воздухоподогревателя, обогреваемого дымовыми газами. Температура воздуха на входе  $t'_e = 30$  °С и на выходе  $t''_e = 200$  °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  $V_g = 1,67$  м<sup>3</sup>/с = 6000 м<sup>3</sup>/ч; коэффициент теплопередачи от газов к воздуху  $k = 15$  Вт/(м<sup>2</sup> · град).

*Решение*

Количество тепла, передаваемое от газов к воздуху:

$$Q_B = V_B \cdot C'_B (t''_B - t'_B) = 1,67 \cdot 1,323 \cdot 10^3 \cdot 170 = 375 \text{ кВт},$$

где  $C'_B$  – средняя объемная изобарная теплоемкость воздуха,  $C'_B = 1,323 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}$ .

Среднюю логарифмическую разность температур при прямотоке найдем по формуле



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

Необходимая поверхность нагрева воздухоподогревателя

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

Средняя логарифмическая разность при противотоке

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

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. – Москва: ИНФРА-М, 2019. – 234 с.
- 2 **Кудинов, В. А.** Теплотехника / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – Москва: 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. – Москва: ИНФРА-М, 2021. – 321 с.
- 5 Техническая термодинамика и теплотехника / Под ред. А. А. Захаровой. – 2-е изд., испр. – Москва: Академия, 2008. – 460 с.
- 6 **Кудинов, В. А.** Техническая термодинамика / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – 5-е изд., стер. – Москва: Высшая школа, 2007. – 218 с.
- 7 **Металлургическая теплотехника: учебник для вузов: в 2 т. / В. А. Кривандин [и др.].** – Москва: Металлургия, 1986. – Т. 2. – 326 с.