

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»

ТЕПЛООБМЕН

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальностей
6-05-0714-02 «Технология машиностроения,
металлорежущие станки и инструменты»
и 6-05-0611-01 «Информационные системы и технологии»
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2025

УДК 536.24
ББК 31.31
Т 34

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты»
«18» сентября 2025 г., протокол № 2

Составитель канд. техн. наук В. Б. Попов

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены для студентов специальностей 6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» и 6-05-0611-01 «Информационные системы и технологии» дневной и заочной форм обучения.

Учебное издание

ТЕПЛООБМЕН

Ответственный за выпуск	С. Н. Хатетовский
Корректор	И. В. Голубцова
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 56 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. Введение в тепломассообмен.....	4
2 Практическое занятие № 2. Коэффициент теплопроводности.....	6
3 Практическое занятие № 3. Передача теплоты в стационарном режиме через плоскую, цилиндрическую и шаровую стенки	9
4 Практическое занятие № 4. Передача теплоты в стационарном режиме через ребристую поверхность	11
5 Практическое занятие № 5. Нестационарная теплопроводность.....	13
6 Практическое занятие № 6. Конвективный теплообмен при течении жидкости по трубе	15
7 Практическое занятие № 7. Свободная конвекция.....	17
8 Практическое занятие № 8. Теплообмен излучением в прозрачной среде.....	19
Список литературы	22

1 Практическое занятие № 1. Введение в тепломассообмен

Рассмотреть теоретические вопросы: тепловой поток, вектор плотности теплового потока, закон Фурье, коэффициент теплопроводности, уравнение теплопроводности.

Общие сведения

Теплопроводность – перенос теплоты посредством теплового движения микрочастиц в сплошной среде, обусловленный неоднородным распределением температуры. В чистом виде процесс происходит в твердых телах, а в жидкостях и газах – при отсутствии перемещения среды.

Теплопередача – процесс теплообмена между жидкими или газообразными средами, разделенными твердой стенкой.

Стационарным режимом называется тепловой режим, при котором температурное поле не зависит от времени.

Тепловой поток Q , Вт, – количество теплоты, передаваемой в единицу времени ($1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}$).

Поверхностная плотность теплового потока q , Вт/м², – тепловой поток, проходящий через единицу площади F поверхности теплообмена:

$$q = Q / F.$$

Линейная плотность теплового потока q_l , Вт/м, – тепловой поток, отнесенный к единице длины l цилиндрической трубы:

$$q_l = Q / l.$$

Теплопроводность материала или коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К), – величина, равная отношению поверхностной плотности теплового потока q к модулю температурного градиента:

$$\lambda = q / |\text{grad } T|.$$

Зависимость теплопроводности λ_t от температуры t , °С, приблизительно можно выразить в виде линейной функции

$$\lambda_t = \lambda_0(1 + bt),$$

где λ_0 – теплопроводность при 0 °С, Вт/(м·К);

b – постоянная, зависящая от природы материала, определяется опытным путем, К⁻¹.

Задача 1. Плоская стенка выполнена из материала с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 20 \text{ Вт/(м·К)}$. Толщина стенки $\delta = 10 \text{ мм}$. На одной стороне стенки температура $t_{c1} = 100 \text{ °С}$, на другой – 90 °С . Найти плотность теплового потока через стенку и температуру в середине стенки.

Решение

Плотность теплового потока

$$q = \lambda(t_{cm1} - t_{cm2})\delta \cdot 10^{-3} = 20 \cdot (100 - 90) 10 \cdot 10^{-3} = 20000 \text{ Вт·м}^2.$$

Так как при $\lambda = \text{const}$ температура в стенке изменяется по линейному закону, то в середине стенки

$$t_{cp} = 12(t_{cm1} + t_{cm2}) = 12 \cdot (100 + 90) = 95 \text{ °С}.$$

Решить следующие задачи.

Задача 2. Чтобы уменьшить до заданного значения тепловые потери с поверхности промышленного теплообменника, решили закупить тепловую изоляцию с $\lambda'_{из} = 0,2 \text{ Вт/(м·К)}$. Оказалось, что на складе имеется изоляция, для которой $\lambda''_{из} = 0,1 \text{ Вт/(м·К)}$, но она на 50 % дороже первой. Больше или меньше (и насколько) придется заплатить за вторую изоляцию?

Задача 3. Температура внешней металлической поверхности сушильной камеры $t_{c1} = 150 \text{ °С}$. Сушильная камера изолирована матами из минеральной стекловаты. Толщина мата $\delta = 60 \text{ мм}$. Температура воздуха в помещении $t_{жс2} = 15 \text{ °С}$ и коэффициент теплоотдачи $\alpha_2 = 10 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$. Найти температуру наружной поверхности тепловой изоляции t_{c2} .

Задача 4. Температура верхней поверхности льда на озере равна минус 10 °С . Плотность теплового потока через лед составляет $28,1 \text{ Вт/м}^2$, а теплопроводность льда $\lambda_l = 2,25 \text{ Вт/(м·К)}$. Определить максимальную толщину слоя льда, который может образоваться в этих условиях.

Контрольные вопросы

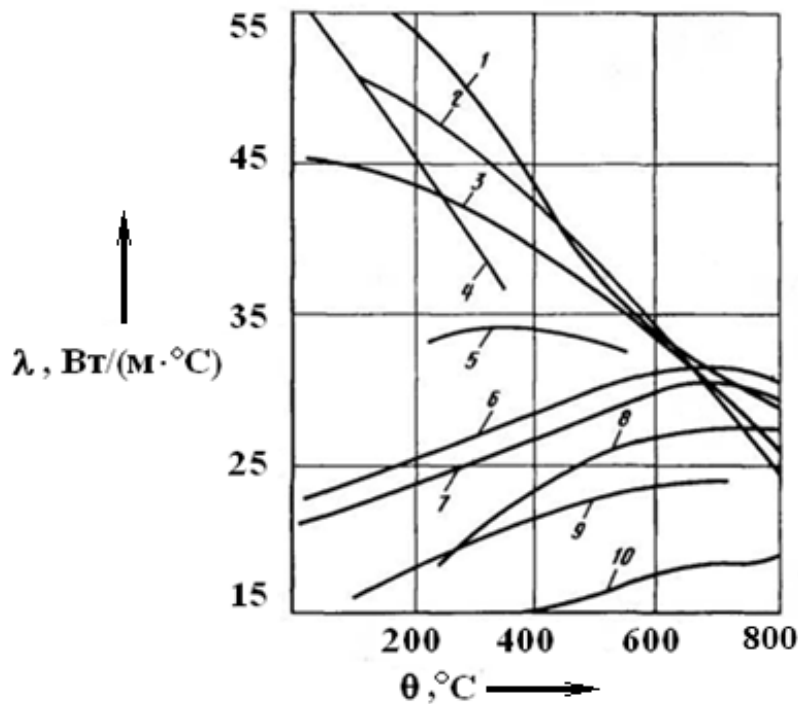
- 1 Приведите примеры периодических нестационарных процессов теплопроводности.
- 2 Приведите примеры и охарактеризуйте особенности процесса нестационарной теплопроводности при стремлении тела к тепловому равновесию.
- 3 Определение теплового потока.
- 4 Какова физическая сущность передачи тепла при теплопроводности?
- 5 Что такое температурное поле?
- 6 Что такое температурный градиент?
- 7 Как записывается уравнение Фурье?

2 Практическое занятие № 2. Коэффициент теплопроводности

Рассмотреть методику определения коэффициента теплопроводности для сталей.

Коэффициент теплопроводности λ – это количество теплоты, передаваемое за единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице. Данный параметр напрямую характеризует не скорость передачи и выравнивания температуры, а величину тепловой энергии, которая может распространяться в структуре в единицу времени через единицу площади. Поэтому коэффициент λ в явном виде не учитывает способность любого тела аккумулировать тепло (не учитывает теплоёмкость). Коэффициент λ используется для описания процессов переноса тепловой энергии.

Коэффициент теплопроводности λ является одной из физических характеристик вещества однородных тел. Его значения определяют преимущественно экспериментальным путем. Эксперименты показывают, что коэффициенты теплопроводности твердых тел зависят от их химического состава и температуры. На рисунке 2.1 приведены зависимости $\lambda(\theta)$ для некоторых конструкционных и инструментальных материалов.



1 – твердый сплав ВК8; 2 – сталь 40; 3 – сталь 30Х; 4 – алмаз синтетический (значения по осям умножить на 10); 5 – олово; 6–8 – быстрорежущие стали Р9К5, Р19К5Ф5, Р18 соответственно; 9 – коррозионно-стойкая сталь 1Х18Н9Т; 10 – жаропрочный титановый сплав ОТ4

Рисунок 2.1 – Зависимость коэффициентов теплопроводности от температуры

Из рисунка видно, что температурные зависимости коэффициента теплопроводности имеют достаточно сложный вид. В одних случаях с увеличением θ коэффициент λ снижается, а в других – возрастает, причем темп изменения λ в различных диапазонах температур может быть разным.

Значения коэффициентов теплопроводности приводят обычно в таблицах (таблицы 2.1 и 2.2) либо рассчитывают по формулам, аппроксимирующим результаты экспериментов.

Таблица 2.1 – Коэффициент теплопроводности λ материалов заготовки и инструмента (средние в диапазоне температур, возникающих при механической обработке)

Материал	Марка	λ , Вт/(м · °С)
Сталь углеродистая	40	38,5
	45	40,2
Сталь низколегированная	30X	35,2
	40X	33,9
	ШХ15	33,4
	20ХН3А	33,5
	30ХГС	36,0
	20Х23Н18	21,5
Сталь аустенитного класса	110Г13Л	22,2
	12Х18Н9Т	22,6
	14Х17Н2	25,0
	У12	34,7
Сталь инструментальная	ХВГ	27,2
	P18	27,2
	BT4	12,9
Жаропрочный сплав	ХН77ТЮР	19,7
Чугун	СЧ30	39,8
Твердый сплав	BK8	54,4
	T14K8	33,9
Алмаз	T15K6	27,2
	АС	520,0
Кубический нитрид бора (эль-бор)	–	41,9
	–	
Медь		361,0

Таблица 2.2 – Коэффициенты в формулах (2.2) для расчета коэффициентов теплопроводности углеродистых сталей

Коэффициент	a_i	b_i	c_i
m_1	76,8	$-6,67 \cdot 10^2$	0
m_2	34,2	$-9,88 \cdot 10^2$	$8,14 \cdot 10^5$
m_3	9,3	$-3,95 \cdot 10^2$	$4,18 \cdot 10^5$

Например, Б. Е. Неймарком предложены формулы для расчета коэффициентов теплопроводности углеродистых сталей.

$$\lambda = m_1 - m_2 \Sigma + m_3 \Sigma^2, \quad (2.1)$$

где Σ – суммарное содержание всех добавок к железу, включая углерод, %;
 m_i (при $i = 1, 2, 3$) – коэффициенты, зависящие от температуры.

$$m_i = a_i - b_i \theta + c_i \theta^2, \quad (2.2)$$

где a_i, b_i, c_i – приведенные в таблице 2.2 значения.
 Формула (2.2) применима при $0,1 < \Sigma < 2,0$.

Задача 1. Определить коэффициент теплопроводности материала стенки, если при ее толщине $\delta = 40$ мм и разности температур на поверхностях $\Delta t = 20$ °С плотность теплового потока $q = 145$ Вт/м².

Решение

Решение находим, применяя формулу

$$q = \frac{(t_{c1} - t_{c2}) \lambda}{\delta};$$

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{t_{c1} - t_{c2}} = \frac{145 \cdot 0,04}{20} = 0,29 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}.$$

Решить следующие задачи.

Задача 2. Как изменится коэффициент теплопередачи, если заменить стальные трубы диаметром $38 \times 2,5$ мм на медные такого же размера для воздушно-парового калорифера, в котором коэффициенты теплоотдачи $\alpha_1 = 11000$ и $\alpha_2 = 40$ Вт/(м²·К)? Расчет произвести по формулам для плоской стенки.

Задача 3. Для проведения испытаний смонтирована сборка из пяти стальных листов толщиной 0,5 мм каждый. Между листами проложены прокладки изоляционной бумаги толщиной по 0,05 мм и теплопроводностью $\lambda = 0,116$ Вт/(м·К). Найти эквивалентную теплопроводность $\lambda_{\text{экв}}$ сборки (в поперечном направлении, температура воздуха – 20 °С).

Задача 4. Нагреватель и холодильник имеют температуры 200 °С и 0 °С соответственно. Между их поверхностями зажат диск диаметром 150 мм и толщиной 25 мм, сквозь который проходит тепловой поток 60 Вт. Между поверхностями нагревателя, диска и холодильника имеются воздушные зазоры толщиной 0,1 мм. Пренебрегая лучистым теплообменом и потерями теплоты, найти теплопроводность материала диска с учетом и без учета воздушных зазоров. Теплопроводность воздуха в зазорах определить по температурам нагревателя и холодильника.

Задача 5. Кварцевая трубка диаметром $2,7 \times 1$ мм и длиной 100 мм заполнена жидкостью. Вдоль трубки по центру расположена платиновая нить диаметром 0,1 мм, нагреваемая электрическим током. Измерения показали: температура нити – 221 °С, на внешней поверхности трубки – 206 °С; тепловой поток от нагретой нити через слой жидкости равен 2,5 Вт. Найти теплопроводность и среднюю температуру жидкости в трубке. Теплопроводность кварца принять 1,58 Вт/(м·К).

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение коэффициента теплопроводности.
- 2 В каких единицах измеряется коэффициент теплопроводности?
- 3 От каких факторов зависит коэффициент теплопроводности?
- 4 Что такое термическое сопротивление плоской стенки?
- 5 Что такое удельный тепловой поток?

3 Практическое занятие № 3. Передача теплоты в стационарном режиме через плоскую, цилиндрическую и шаровую стенки

Задача 1. Металлическая труба с внутренним диаметром $d_1 = 160$ мм и наружным диаметром $d_2 = 170$ мм покрыта двухслойной тепловой изоляцией. Толщина первого слоя изоляции (жароупорной) $\delta_2 = 20$ мм, второго слоя – $\delta_3 = 50$ мм. Температура внутренней поверхности трубы $t_{w1} = 300$ °С, наружной поверхности второго слоя изоляции – $t_{w4} = 40$ °С. Определить тепловые потери трубопровода на 1 м его длины, если коэффициент теплопроводности материала трубы $\lambda_1 = 50$ (Вт/м)град, первого слоя – $\lambda_2 = 0,11$ (Вт/м)град, второго слоя – $\lambda_3 = 0,034$ (Вт/м)град.

Решение

Тепловой поток, проходящий через стенку трубы длиной в 1 м, может быть вычислен по формуле

$$q = \frac{\pi \cdot (t_{w1} - t_{w4})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3}}, \quad (3.1)$$

где

$$d_3 = d_2 + 2 \cdot \delta_2 = 170 + 2 \cdot 20 = 210 \text{ мм}; \quad (3.2)$$

$$d_4 = d_3 + 2 \cdot \delta_3 = 210 + 2 \cdot 50 = 310 \text{ мм}. \quad (3.3)$$

Откуда

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot (300 - 40)}{\frac{2,303}{50} \cdot \lg \frac{170}{160} + \frac{2,303}{0,11} \cdot \lg \frac{210}{170} + \frac{2,303}{0,035} \cdot \lg \frac{310}{210}} = 125 \text{ Вт/м.}$$

Решить следующие задачи.

Задача 2. Стена из силикатного кирпича толщиной 250 мм имеет с одной стороны температуру минус 30 °С, а с другой – температуру 20 °С. Найти плотность теплового потока через стену и глубину ее промерзания до температуры 0 °С, считая коэффициент теплопроводности материала стены постоянным.

Задача 3. К медному стержню диаметром 20 мм и длиной 200 мм с одного конца через торец подводится теплота. Другой конец охлаждается потоком воды, которая при расходе 0,0167 кг/с нагревается от стержня на 2 °С. Найти перепад температур между концами стержня, приняв, что через боковую поверхность стержня тепловые потери отсутствуют.

Задача 4. По чугунному трубопроводу диаметром 60 × 3,5 мм движется пар с температурой 325 °С. Коэффициент теплоотдачи от пара к трубе $\alpha_1 = 110 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Окружающий наружный воздух имеет температуру 20 °С. Найти тепловые потери:

а) если трубопровод не изолирован и охлаждается воздухом с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_2 = 25 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$;

б) если трубопровод изолирован слоем пеношамота толщиной 70 мм, а $\alpha_2 = 15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Задача 5. Варочный котел сферической формы с наружным диаметром 1200 мм сделан из нержавеющей стали. Толщина стенки котла – 10 мм. Внутри находится жидкость с температурой 140 °С; снаружи котел покрыт слоем асбеста толщиной 60 мм. Температура воздуха в цехе – 29 °С. Коэффициент теплоотдачи внутри и снаружи котла $\alpha_1 = 600 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ и $\alpha_2 = 18 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ соответственно. После включения вентиляции в цехе температура воздуха снизилась до 23 °С, а коэффициент теплоотдачи α_2 от наружной поверхности котла увеличился в 1,6 раза. На сколько процентов возросли потери теплоты от котла?

Задача 6. Оконная рама состоит из двух слоев стекла толщиной по 5 мм каждый. Между стеклами находится слой сухого неподвижного воздуха толщиной 6 мм со средней температурой 0 °С. Площадь поверхности окна – 4,5 м². Определить потерю теплоты теплопроводностью через окно, если разность температур на внешних поверхностях стекол составляет 25 °С.

Задача 7. Стальной трубопровод диаметром 200 × 8 мм проложен на открытом воздухе, температура которого равна минус 17 °С. Внутри трубы движется

вода со средней температурой $93\text{ }^{\circ}\text{C}$, а коэффициент теплоотдачи от воды к трубе $\alpha_1 = 820\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Определить потерю теплоты трубопроводом, если его длина равна 23 м , а коэффициент теплоотдачи от трубы к окружающему воздуху $\alpha_2 = 9\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Контрольные вопросы

1 Схематически изобразите распределение температуры в однородной плоской стенке для постоянного коэффициента теплопроводности и линейно зависящего от температуры коэффициента теплопроводности.

2 Дайте определение и запишите единицы измерения коэффициента теплопередачи, термических сопротивлений теплопроводности, теплоотдачи, теплопередачи, сопротивления контакта.

3 Запишите выражение для определения теплового потока через многослойную плоскую стенку в процессе теплопередачи.

4 Запишите выражение и схематически изобразите распределение температуры в однородной и многослойной цилиндрических стенках при заданных температурах поверхностей.

5 Запишите выражение для плотности теплового потока в случае многослойной плоской стенки, состоящей из n однородных слоев.

6 Дайте определение и запишите выражение для расчета эквивалентного коэффициента теплопроводности многослойной плоской.

4 Практическое занятие № 4. Передача теплоты в стационарном режиме через ребристую поверхность

Общие сведения

Для интенсификации теплопередачи между средами применяют оребрение поверхностей стенки, разделяющей эти среды. Как правило, оребрение осуществляется на той поверхности теплообмена, где имеет место малый коэффициент теплоотдачи (или большое термическое сопротивление).

Задача 1. Определить коэффициент оребрения стенки, при котором величина теплового потока увеличится вследствие оребрения в 10 раз, если оребренной является холодная поверхность стенки и известны следующие величины: коэффициент теплопроводности стенки $\lambda = 32\text{ (Вт/м)град}$; толщина стенки без ребер $\delta = 8\text{ мм}$; коэффициенты теплоотдачи с горячей стороны стенки $\alpha_1 = 200\text{ (Вт/м}^2\text{)град}$, с холодной – $\alpha_2 = 10\text{ (Вт/м}^2\text{)град}$.

Решение

Для увеличения теплового потока в 10 раз следует во столько же раз уменьшить полное термическое сопротивление теплопередачи. Полное термическое

сопротивление теплопередачи для неоребренной поверхности определяется по формуле

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{200} + \frac{0,008}{32} + \frac{1}{20} = 0,1075 \text{ (град} \cdot \text{м}^2\text{)/ Вт.} \quad (4.1)$$

Полное термическое сопротивление оребренной поверхности

$$\frac{1}{k'} = 0,1 \cdot \frac{1}{k} = 0,01075 \text{ (град} \cdot \text{м}^2\text{)/ Вт.} \quad (4.2)$$

Если оребруется холодная поверхность, то коэффициент оребления F_2/F_1 может быть найден из уравнения

$$\frac{1}{k'} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{1}{\alpha_2}. \quad (4.3)$$

Тогда

$$0,01075 = \frac{1}{200} + \frac{0,008}{32} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{1}{10};$$

$$\frac{F_2}{F_1} = 18.$$

Решить следующие задачи.

Задача 2. Во сколько раз увеличится отдаваемый тепловой поток, если на поверхности площадью 800×800 мм разместить 24 ребра прямоугольного сечения высотой 35 мм, толщиной 5 мм? Материал – латунь, температура окружающей среды – 10°C , температура поверхности у основания ребра – 70°C . Принять коэффициент теплоотдачи от гладкой и ребристой поверхностей равным $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Задача 3. Воздух в холодильной камере отдает теплоту охлаждающему устройству из горизонтальных труб с наружным диаметром 14 мм. Температура воздуха в камере равна минус 5°C , температура наружной поверхности трубы – минус 10°C . Во сколько раз возрастет тепловой поток от воздуха к трубам, если трубы оребрить поперечными круглыми латунными ребрами с постоянной толщиной 1 мм? Диаметр ребер – 38 мм, шаг – 12,5 мм. Средний коэффициент теплоотдачи к ребристой поверхности трубы принять $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Задача 4. Определить тепловой поток, передаваемый круглым ребром окружающему воздуху, имеющему температуру $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Диаметр ребра – 150 мм, толщина – 2 мм, шаг – 10 мм. Ребро находится на трубе диаметром 80×3 мм. Материал – медь. В трубе движется жидкость со средней температурой $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости – $170\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, со стороны воздуха – $8\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Задача 5. Проанализировать зависимость теплового потока, передаваемого через оребренную поверхность к воздуху, от эффективной высоты ребра по условию задачи 4. Для анализа принять наружный диаметр трубы равным 20, 50, 120 мм, остальные условия оставить без изменений. Построить график зависимости $Q = f(h_{\text{эф}})$.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение коэффициента оребрения.
- 2 С какой целью выполняют оребрение поверхности?
- 3 Что необходимо выполнить для уменьшения теплового потока?
- 4 Перечислите способы интенсификации теплопередачи.
- 5 Может ли коэффициент теплопередачи быть больше какого-либо из коэффициентов теплоотдачи?
- 6 Почему нецелесообразно оребрывать стенку со стороны большего коэффициента теплоотдачи?
- 7 Перечислите формы ребер и их профили, способы крепления.
- 8 Ребра какой формы и профиля экономически более эффективны?

5 Практическое занятие № 5. Нестационарная теплопроводность

Общие сведения

Нестационарная теплопроводность характеризуется изменением температурного поля тела во времени и связана с изменением энтальпии тела при его нагреве или охлаждении.

Задача 1. Резиновая пластина толщиной $2\delta = 20$ мм, нагретая до температуры $t_0 = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, помещена в воздушную среду с температурой $t_{\text{ж}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить температуры в середине и на поверхности пластины через $\tau = 20$ мин после начала охлаждения. Коэффициент теплопроводности резины $\lambda = 0,175\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$. Коэффициент температуропроводности резины $a = 0,833 \cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающему воздуху $\alpha = 65\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{C})$.

Решение

В рассматриваемом случае

$$B_i = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda} = \frac{65 \cdot 0,01}{0,175} = 3,73; \quad (5.1)$$

$$F_o = \frac{\alpha \cdot \tau}{\delta^2} = \frac{0,833 \cdot 10^{-7} \cdot 1200}{0,01^2} = 1,0. \quad (5.2)$$

По этим данным по справочнику находим температуры: $\Theta_{x=0} = 0,26$; $\Theta_{x=\delta} = 0,083$.

Безразмерная температура

$$\Theta = \frac{t - t_{жс}}{t_0 - t_{жс}}. \quad (5.3)$$

Откуда

$$t_{x=0} = t_{жс} + \Theta_{x=0} \cdot (t_0 - t_{жс}) = 15 + 0,26 \cdot (140 - 15) = 47,5 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (5.4)$$

$$t_{x=\delta} = t_{жс} + \Theta_{x=\delta} \cdot (t_0 - t_{жс}) = 15 + 0,083 \cdot (140 - 15) = 25,4 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5.5)$$

Решить следующие задачи.

Задача 2. Стальной лист толщиной 30 мм (теплоемкость – 0,42 кДж/(кг·К), плотность – 7900 кг/м³) нагрет до 400 °С и охлаждается в воздухе с температурой 10 °С при коэффициенте теплоотдачи 20 Вт/(м²·К). Через сколько часов температура листа на поверхности будет на 11 °С отличаться от температуры воздуха? Сколько теплоты будет отдано с 1 м² листа за время охлаждения?

Задача 3. Вал диаметром 140 мм с температурой 27 °С поместили в нагреватель, где температура постоянна и равна 860 °С. Процесс нагрева длился до получения на поверхности вала температуры 520 °С. Найти время нагрева и температуру на оси вала, если теплопроводность материала вала составляет 38 Вт/(м·К), температуропроводность – 6,94·10⁻⁶ м²/с, а коэффициент теплоотдачи – 163 Вт/(м²·К).

Задача 4. Брусек металла размером 400 × 600 × 700 мм с начальной температурой 30 °С (теплопроводность – 35 Вт/(м·К), коэффициент температуропроводности – 6,25·10⁻⁶ м²/с) разогревается в печи, где температура равна 1200 °С и коэффициент теплоотдачи – 175 Вт/(м²·К). Найти температуру в центре бруска через 2 ч после начала разогрева.

Задача 5. Вал диаметром 0,21 м и длиной 0,36 м первоначально имеет температуру 20 °С и нагревается в печи, где температура равна 900 °С, а коэффициент теплоотдачи – 134 Вт/(м²·К). Теплоемкость материала вала – 0,4 кДж/К, плотность – 6500 кг/м³, теплопроводность – 20 Вт/(м·К). Найти с помощью графиков температуру через 1,2 ч после начала нагрева: в центре торца вала; в центре вала; на поверхности вала в середине его длины; на окружности торца. Определить количество теплоты, которая будет передана валу в печи за время нагрева.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите примеры периодических нестационарных процессов теплопроводности.
- 2 Приведите примеры и охарактеризуйте особенности процесса нестационарной теплопроводности при стремлении тела к тепловому равновесию.
- 3 Запишите дифференциальное уравнение нестационарного процесса теплопроводности без внутренних источников тепла.
- 4 Дайте определение критериев Био и Фурье, поясните их физический смысл.
- 5 Что такое избыточная температура и безразмерная избыточная температура?
- 6 Каков порядок решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в безразмерном виде? Поясните его структуру.

6 Практическое занятие № 6. Конвективный теплообмен при течении жидкости по трубе

Общие сведения

Теплоотдачей называется конвективный теплообмен между твердым телом и движущейся средой (жидкостью или газом), который осуществляется совместным действием теплопроводности и конвекции при наличии температурного напора Δt между телом и средой. Вынужденное движение среды вызывается различного рода внешними возбудителями (насосами, вентиляторами и т. п.).

Поскольку процесс теплоотдачи связан с движением среды, выделяют два основных режима течения – ламинарный, при котором частицы движутся упорядоченно, слои не перемешиваются друг с другом, и турбулентный, когда частицы совершают неупорядоченные движения, в результате чего различные слои интенсивно перемешиваются. Переход от одного режима к другому определяется некоторым «критическим» значением числа Рейнольдса.

При течении среды на поверхности стенки образуется гидродинамический пограничный слой вязкой жидкости. В пределах этого слоя (по нормали к поверхности) скорость потока изменяется от нуля на поверхности до скорости невозмущенного потока на внешней границе слоя. Движение жидкости в пограничном слое может иметь ламинарный и турбулентный характер, а толщина слоя постепенно возрастает по направлению движения жидкости.

Задача 1. Для лабораторной установки требуется подавать воду по горизонтальной стеклянной трубке при $t_f = 80^\circ\text{C}$ со скоростью $w = 0,2$ м/с. Внутренний диаметр трубки $d = 3$ мм. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи, если изменение температуры $\Delta t = 5^\circ\text{C}$.

Решение

При определяющей температуре 80°C значения физических параметров воды: $\lambda = 67,5 \cdot 10^{-2}$ (Вт/м)град; $\nu = 0,365 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\beta = 6,32 \cdot 10^{-4}$ 1/град; $Pr = 2,21$. Для выбора критериального уравнения определяем

$$R_e = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{0,2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{0,365 \cdot 10^{-6}} = 1640. \quad (6.1)$$

Определяем критерий G_r :

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \Delta t = \frac{9,81 \cdot 6,32 \cdot 10^{-4} \cdot (3 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 5}{(0,365 \cdot 10^{-6})^2} = 0,63 \cdot 10^4. \quad (6.2)$$

Определяем критерий N_u :

$$N_u = 0,17 \cdot R_e^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot G_r^{0,1} = 0,17 \cdot 1640^{0,33} \cdot 2,21^{0,43} \cdot (0,63 \cdot 10^4)^{0,1} = 6,7. \quad (6.3)$$

Определяем значение α :

$$\alpha = N_u \cdot \frac{\lambda}{d} = 6,7 \cdot \frac{0,675}{0,003} = 1510 \text{ (Вт/м}^2\text{)град.} \quad (6.4)$$

Решить следующие задачи.

Задача 2. По горизонтальной трубе диаметром 20×1 мм протекает вода с температурой 85°C на входе. Средняя температура стенки – 15°C . Расход воды – $0,5$ кг/с. На выходе из трубы вода должна иметь температуру 25°C . Какой длины трубу следует для этого взять?

Задача 3. В трубу водоподогревателя с температурой стенки 250°C вода входит с $t_1 = 160^\circ\text{C}$ и выходит с $t_2 = 240^\circ\text{C}$. Режим течения воды – турбулентный, скорость – 1 м/с. Тепловая нагрузка поверхности нагрева трубы – $3,7 \cdot 10^5$ Вт/м². Найти внутренний диаметр и длину трубы.

Задача 4. Трансформаторное масло с температурой 90°C охлаждается, протекая со скоростью $0,4$ м/с вдоль металлической плиты, температура которой поддерживается равной 20°C . Найти коэффициент теплоотдачи, если длина плиты по направлению потока составляет 500 мм.

Задача 5. Найти коэффициент теплоотдачи при движении воздуха со скоростью 11 м/с по горизонтальной трубе диаметром $35 \times 2,5$ мм и длиной 5 м. Средняя температура воздуха – 40 °С, а стенки трубы – 20 °С. Найти температуру воздуха на входе и выходе из трубы.

Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте закон Ньютона – Рихмана.
- 2 Запишите определение коэффициента теплоотдачи.
- 3 Перечислите виды конвекции и дайте их определение.
- 4 Каким процессом является теплоотдача – простым или сложным? Почему?
- 5 Перечислите теплофизические свойства жидкостей. Назовите порядок величины коэффициентов вязкости для воды и воздуха при комнатной температуре.
- 6 Является ли коэффициент теплоотдачи теплофизическим свойством?
- 7 Запишите определение и единицы измерения динамической и кинематической вязкости.
- 8 Дайте определение гидродинамического и температурного пограничных слоев.

7 Практическое занятие № 7. Свободная конвекция

Общие сведения

Свободная конвекция – движение среды, возникающее в гравитационном поле вследствие неоднородного распределения плотности, вызванного в однофазной среде наличием температурного градиента. Поля скорости и температуры существенно зависят друг от друга.

Рассмотрено свободное гравитационное течение для наиболее простых форм поверхности твердого тела (вертикальная плита, горизонтальный цилиндр). Предполагается, что объем жидкости настолько велик, что свободное движение, возникающее у других тел, расположенных в этом объеме, не сказывается на рассматриваемом течении. Как и при вынужденной конвекции, свободное движение жидкости может быть как ламинарным, так и турбулентным.

Задача 1. Определить тепловые потери вертикальной трубы с внешним диаметром $d = 100$ мм и длиной $h = 8$ м, если температура наружной поверхности трубы $t_w = 180$ °С, а температура окружающего воздуха $t_f = 20$ °С.

Решение

Данная задача относится к случаю свободного движения в неограниченном пространстве, для расчета может быть использовано соответствующее критериальное уравнение. Определяющая температура

$$t_m = \frac{t_w + t_f}{2} = \frac{180 + 20}{2} = 100^\circ\text{C}. \quad (7.1)$$

Определяем соответствующие этой температуре параметры воздуха при $t_m = 100^\circ\text{C}$: $\lambda = 3,21 \cdot 10^{-2}$ (Вт/м)град; $\nu = 23,13 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $P_r = 0,688$.

Определяем критерий G_r :

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \Delta t, \quad (7.2)$$

где $\beta = 1/373$;

Δt – разность температур, $\Delta t = 160^\circ\text{C}$.

Откуда

$$G_r = \frac{9,81 \cdot 0,1^3 \cdot 160}{373 \cdot (23,13 \cdot 10^{-6})^2} = 7,9 \cdot 10^{-6}.$$

Определяем произведение:

$$G_r \cdot P_r = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,688 = 5,43 \cdot 10^{-6}.$$

По справочнику определяем: $C = 0,54$; $n = 1/4$.

Определяем критерий N_u :

$$N_u = C \cdot (G_r \cdot P_r)^n = 0,54 \cdot (5,43 \cdot 10^{-6})^{0,25} = 26. \quad (7.3)$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = N_u \cdot \frac{\lambda}{d} = \frac{26 \cdot 3,21 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 8,4 \text{ (Вт/м}^2\text{)град}. \quad (7.4)$$

Тепловые потери

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_w - t_f) = 8,4 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 8 \cdot 160 = 3340 \text{ Вт}. \quad (7.5)$$

Решить следующие задачи.

Задача 2. Горизонтальная плита с обращенной вверх теплоотдающей поверхностью имеет размеры 600 × 1100 мм и нагрета до 80 °С. Вдали от плиты воздух имеет температуру 30 °С. Найти тепловой поток от плиты к окружающему воздуху.

Задача 3. В большом баке с водой охлаждается вертикальная пластина шириной 3 м и высотой 2 м; ее температура – 90 °С. Средняя температура воды – 40 °С. Найти передаваемую воде теплоту.

Задача 4. Провести анализ зависимости коэффициента теплоотдачи для вертикального цилиндра при свободном движении от каждой из следующих величин: высоты H ; вязкости среды μ ; температурного напора Δt ; плотности среды ρ ; теплоемкости среды c_p ; коэффициента объемного расширения βP среды: для газа; для капельной жидкости. Принять $(GrPr)_{ж}$ заключенной в интервале $10^3 \dots 10^9$.

Задача 5. В узкой щели между стенками, имеющими на поверхности температуры 160°C и 60°C , циркулирует воздух. Воздушная прослойка в щели имеет толщину 25 мм. Найти плотность теплового потока между стенками. Как изменится плотность теплового потока, если толщину воздушного слоя уменьшить в 2 раза, а остальные условия оставить без изменения?

Контрольные вопросы

- 1 Чем отличается свободное движение жидкости в большом объеме от свободного движения в ограниченном пространстве? Как это влияет на теплоотдачу?
- 2 Какой закон принимается для изменения температурного напора в пределах теплового пограничного слоя?
- 3 Запишите критериальные уравнения для определения местного и среднего коэффициентов теплоотдачи при свободном ламинарном течении жидкости в большом объеме вдоль вертикальной стенки.
- 4 Какими критериями подобия характеризуется теплоотдача при свободном движении жидкости?
- 5 Перечислите случаи свободного движения жидкости в большом объеме.
- 6 Какими критериальными уравнениями описывается теплоотдача при свободном движении жидкости в большом объеме?
- 7 Укажите зависимость коэффициента теплоотдачи при свободном движении жидкости вдоль вертикальной стенки от ее высоты.
- 8 Укажите диапазон значений числа Re , при котором имеет место смешанный режим течения в пограничном слое в случае свободного движения жидкости вдоль вертикальной стенки.

8 Практическое занятие № 8. Теплообмен излучением в прозрачной среде

Общие сведения

Теплообмен излучением – передача теплоты, связанная с превращением внутренней энергии тела в энергию электромагнитных волн (или фотонов) и последующим превращением последней во внутреннюю энергию других тел.

В инженерных расчетах теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой, проводится в предположении о том, что излучающие

поверхности – серые и их излучение – диффузное с постоянной плотностью на изотермических участках поверхности.

Серым телом называется тело, имеющее непрерывный спектр излучения, полностью подобный спектру абсолютно черного тела при той же температуре, его спектральный коэффициент теплового излучения постоянен во всем диапазоне длин волн от нуля до бесконечности и не зависит от температуры. Диффузное излучение характеризуется интенсивностью, не зависящей от направления.

При расчетах теплового излучения серых тел применяется понятие эффективного излучения. Оно представляет собой совокупность собственного E излучения тела и отраженного $E_{отр}$ излучения.

Задача 1. Определить величину собственного излучения полированной алюминиевой поверхности при температуре $t_w = 530\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Решение

Величина собственного излучения определяется по уравнению

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_w}{100} \right)^4, \quad (8.1)$$

где $\varepsilon = 0,054$.

Откуда

$$E = 0,054 \cdot 5,7 \cdot \left(\frac{530 + 273}{100} \right)^4 = 1280 \text{ Вт/м}^2.$$

Решить следующие задачи.

Задача 2. Определить тепловой поток, излучаемый стальной трубой; окисленной поверхностью, имеющей наружный диаметр 70 мм и длину 10 м. Температура поверхности трубы – $230\text{ }^{\circ}\text{C}$. Труба расположена в помещении на большом удалении от стен, температура которых равна $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 3. Экран из окисленного никеля расположен между двумя стальными листами с шероховатой поверхностью. Температура листов – $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Найти температуру экрана и плотность теплового потока излучением. Какой станет плотность теплового потока излучением, если экран будет сделан из хрома?

Задача 4. Температура диска из хрома – $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а из полированной стали – $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Диски имеют одинаковый диаметр, равный 200 мм, и расположены параллельно с центрами на общей нормали на расстоянии 50 мм друг от друга.

Найти:

- средний угловой коэффициент лучеиспускания;
- лучистый тепловой поток между дисками.

Определить те же величины, если расстояние между дисками будет 200 мм.

Задача 5. Рассчитать температуру поверхности детали из окисленной латуни, если излучаемый ею поток энергии имеет плотность 32 кВт/м^2 .

Задача 6. Ртутный термометр в холодильной камере показал температуру минус 17°C . Коэффициент теплового излучения стекла термометра – 0,86. Стенки холодильной камеры имеют температуру минус 14°C . На сколько градусов термометр искажает действительную температуру в камере из-за лучистого теплообмена между стенками и термометром? Принять коэффициент конвективной теплоотдачи между термометром и воздухом в камере равным $3,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Задача 7. Труба из окисленной стали имеет диаметр 100 мм и окружена двумя экранами, расположенными концентрически на одинаковых расстояниях 5 мм друг от друга и от трубы. Экраны сделаны из окисленного никеля. Определить, во сколько раз уменьшится лучистый тепловой поток от горячей трубы при ее экранировании по сравнению с трубой без экранов. Температуры трубы и окружающей среды после установки экранов принять без изменений.

Задача 8. Плоская вертикальная стенка сушилки, находящейся в закрытом помещении, изготовлена из стального листа толщиной 5 мм и длиной 3 м. Внутренняя поверхность стенки омывается продольным потоком воздуха, нагретым до средней температуры 85°C . Скорость воздуха – $2,5 \text{ м/с}$. Чтобы уменьшить теплотери в окружающую среду, температура которой равна 18°C , стенка снаружи изолирована 30-миллиметровым слоем ньювеля, так что на внешней поверхности изоляции установилась температура 45°C . Определить в условиях лучисто-конвективного теплообмена коэффициент теплопередачи через изолированную стенку и потери теплоты с 1 м^2 стенки в окружающую среду.

Задача 9. В теплообменном аппарате кипит раствор при температуре 120°C . Стенка аппарата сделана из титанового листа толщиной 2 мм и изолирована снаружи слоем асбослюды толщиной 45 мм. Определить температуру воздуха в помещении, если температура на внешней поверхности изоляции равна 40°C , а теплота передается от нее излучением и конвекцией. Принять температуру на внутренней поверхности стенки равной температуре раствора.

Задача 10. В цеховом помещении, где температура воздуха и стен $t_s = 3^\circ\text{C}$, расположена горизонтальная труба наружным диаметром $d = 180 \text{ мм}$ и длиной $l = 10 \text{ м}$. Она имеет температуру на поверхности $t_n = -70^\circ\text{C}$ и охлаждается за счет излучения и свободного движения воздуха.

Определить для каждой трубы из следующих материалов: алюминия шероховатого, стали окисленной, латуни окисленной:

- коэффициент теплоотдачи излучением;
- коэффициент теплоотдачи конвекцией;
- тепловой поток от трубы отдельно естественной конвекцией и излучением.

По результатам расчетов выбрать оптимальный вариант материала трубы.

Интегральный коэффициент теплового излучения материалов: алюминий шероховатый – 0,055; сталь окисленная – 0,80; латунь окисленная – 0,6.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение теплового излучения, поясните его механизм.
- 2 Какие виды излучения вы знаете? Какие длины волн им соответствуют?
- 3 Перечислите разновидности излучения, дайте их определение и запишите выражения для их вычисления.
- 4 Какие тела называют абсолютно черными, серыми?
- 5 В каком случае поверхность называется зеркальной, абсолютно белой?
- 6 Что называют лучистым теплообменом?
- 7 Сформулируйте законы Планка, Релея – Джинса и Вина для равновесного излучения абсолютно черного тела.
- 8 Сформулируйте закон Стефана – Больцмана.
- 9 Сформулируйте закон Кирхгофа и следствия из него.
- 10 Дайте определение углового коэффициента излучения.

Список литературы

- 1 **Кудинов, А. А.** Тепломассообмен : учеб. пособие / А. А. Кудинов. – М.: ИНФРА-М, 2022. – 375 с.
- 2 **Резников, А. Н.** Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
- 3 **Резников, А. И.** Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. И. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
- 4 **Краснощеков, Е. А.** Задачник по теплопередаче: учеб. пособие / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1980. – 288 с.
- 5 **Авчухов, В. В.** Задачник по процессам тепломассообмена : учеб. пособие / В. В. Авчухов, Б. Я. Паюсте. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
- 6 **Михайлова, М. М.** Сборник задач и примеров расчета по теплопередаче / М. М. Михайлова. – М. : ВИНТИ, 1963. – 127 с.
- 7 **Аржаева, Н. В.** Тепломассообмен. Практикум: учеб. пособие / Н. В. Аржаева, Н. А. Орлова, С. В. Соболев; под общ. ред. Ю. П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 112 с.