МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Техносферная безопасность»

ТЕРМОДИНАМИКА

Методические рекомендации к лабораторным работам для студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» очной формы обучения

Могилев 2026

УДК 536
ББК 31.81
Т35

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Техносферная безопасность» «31» августа 2026 г., протокол № 1

Составитель канд. техн. наук П. С. Орловский

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Данилов

Методические рекомендации к лабораторным работам содержат основные теоретические положения по теме, методики исследований теплофизических процессов, протекающих в производственных агрегатах, формулы для расчета. Предназначены для студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» очной формы обучения.

Учебное издание

ТЕРМОДИНАМИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Щур
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 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, 2026

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Законы термодинамики. Примеры расчетов по термодинамике ……... 4

2 Лабораторная работа № 2. Расчеты по уравнению состояния. Расчет теплоемкости газов …..... 6

3 Лабораторная работа № 3. Расчет состава и теплоемкости смеси газов. Истечение и дросселирование газов …….……..... 8

4 Лабораторная работа № 4. Расчеты с использованием первого закона термодинамики. Определение направления термодинамических процессов ... 9

5 Лабораторная работа № 5. Циклы энергетических установок. Теплообмен. Решение типовых задач……..……. 10

6 Лабораторная работа № 6. Теплопроводность и теплопередача при стационарном режиме. Теплопроводность при нестационарном режиме …… 14

7 Лабораторная работа № 7. Свободная тепловая конвекция в неограниченном пространстве. Свободная тепловая конвекция в ограниченном пространстве. Расчет конвективного теплообмена в помещении ...……... 16

8 Лабораторная работа № 8. Расчет теплопроводности твердых поверхностей. Расчет лучистого теплообмена между поверхностями.…..……. 22

Список литературы…….. 24

1 Лабораторная работа № 1. Законы термодинамики. Примеры расчетов по термодинамике

Цель работы: освоить применение первого и второго начал термодинамики для решения базовых расчетных задач; сформировать навыки определения изменения внутренней энергии, работы и количества теплоты в основных термодинамических процессах.

1.1 Теоретическая часть

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^2.

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

$$q = -\lambda \cdot \partial t / \partial n \cdot n_0 = -\lambda \cdot gradt.$$

На рисунке 1.1 представлена однородная плоская стенка.

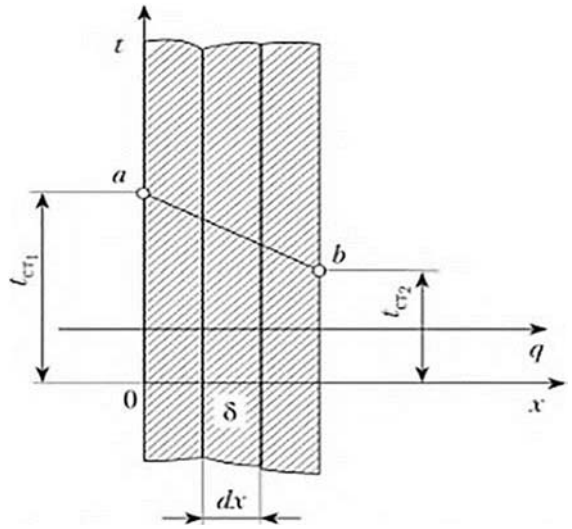


Рисунок 1.1 – Однородная плоская стенка (температуры поверхностей стенки $a = t_{cm1}$ и $b = t_{cm2}$)

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

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

1.2 Практическая часть

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 °С и t_2 = –30 °С. Коэффициент теплопроводности кирпича λ = 0,6 Вт/(м·°С).

Решение

Согласно уравнению

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

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

Задача 2. Определить значение коэффициента теплопроводности материала стенки ковша, если при толщине δ = 30 мм и температурном напоре Δt = 30 °С плотность теплового потока q = 100 Вт/м^2.

Решение

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

Задача 3. Определить плотность теплового потока через плоскую шамотную стенку толщиной δ = 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 λ = 1,0 · (1 + 0,001·t) Вт/(м·°С).

Решение

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

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

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

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

Подставляя полученное значение $\lambda_{ср}$, получим

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

Контрольные вопросы

1 Сформулируйте первое и второе начала термодинамики для закрытой термодинамической системы.

2 В чем заключается физический смысл внутренней энергии идеального газа и от каких макроскопических параметров она зависит?

3 Как рассчитывается работа расширения газа в изобарном, изохорном и изотермическом процессах?

2 Лабораторная работа № 2. Расчеты по уравнению состояния. Расчет теплоемкости газов

Цель работы: научиться применять уравнения состояния идеального и реального газов для расчета параметров термодинамической системы; освоить методику определения теплоемкости газов в различных термодинамических процессах.

2.1 Теоретическая часть

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).

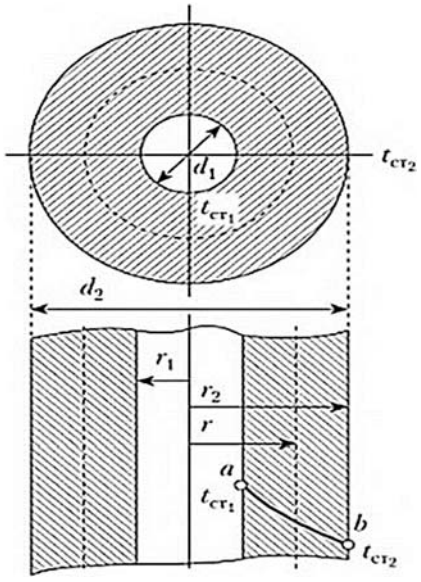


Рисунок 2.1 – Однослойная цилиндрическая стенка

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, $\Delta t = t_{ст1} - t_{ст2}$;

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

$$t_x = t_{ст1} - (t_{ст1} - t_{ст2}) \cdot \ln(d_x / d_1) / \ln(d_2 / d_1).$$

2.2 Практическая часть

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 λ = 50 Вт/(м·°С). Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы α_1 = 1 000 Вт/(м^2·°С) и от трубы к окружающему воздуху α_2 = 12 Вт/(м^2·°С). Определить также температуры на внутренней и внешней поверхностях трубы.

Контрольные вопросы

1 Запишите уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева–Клапейрона) и дайте определение каждой входящей в него величине.

2 В чем разница между массовой, мольной и объемной теплоемкостями газа? Как они связаны между собой через молярную массу?

3 Как зависит теплоемкость реального газа от температуры и почему в инженерных расчетах для идеального газа ее часто принимают постоянной в узких температурных интервалах?

3 Лабораторная работа № 3. Расчет состава и теплоемкости смеси газов. Истечение и дросселирование газов

Цель работы: сформировать навыки расчета термодинамических свойств газовых смесей; изучить и применить на практике методы расчета процессов истечения газов через сопла и процесса дросселирования.

3.1 Практическая часть

Задача. Стальная цилиндрическая заготовка 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 λ = 38 Вт/(м·град); средняя теплоемкость c = 0,703 кДж/(кг·град); плотность ρ = 7850 кг/м^3. Среднее за время нагрева значение коэффициента теплопередачи можно определить по эмпирической формуле α = 0,105($T_{окр}$/100)^3 + 12 Вт/(м^2·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

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

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:

$$F_0 = \alpha\tau / R^2 = 7{,}8,$$

откуда находим время нагрева:

$$\tau = F_0 \cdot (R^2 / \alpha) = 7{,}8 \cdot (0{,}07^2 / 7 \cdot 10^{-6}) = 5470 \text{ с} = 1{,}52 \text{ ч} = 1 \text{ ч } 31 \text{ мин}.$$

Контрольные вопросы

1 Как определяются газовая постоянная и кажущаяся молекулярная масса газовой смеси, если известен ее объемный или массовый состав?

2 Что такое критическое отношение давлений при истечении газа через сопло и как оно влияет на максимальную скорость истечения?

3 В чем заключается физическая суть процесса дросселирования газа? Почему для идеального газа он является изотермическим, а для реального может сопровождаться изменением температуры (эффект Джоуля – Томсона)?

4 Лабораторная работа № 4. Расчеты с использованием первого закона термодинамики. Определение направления термодинамических процессов

Цель работы: закрепить навыки составления уравнений теплового баланса на основе первого закона термодинамики; освоить критерии (включая анализ изменения энтропии) для определения направления и принципиальной возможности протекания термодинамических процессов.

4.1. Теоретическая часть

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.

4.2 Практическая часть

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 × 0,3 м при температуре стенок t_2 = 27 °С.

Решение

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

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

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

$$= 0,79 \cdot 5,7 \cdot 3,14 \cdot 0,073 \cdot \left(5,0^4 - 3,0^4 \right) = 0,79 \cdot 7 \cdot 0,66 \cdot 544 = 1620 \text{ Вт.}$$

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

Согласно этому имеем

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

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

$$q_1 = \frac{Q_{12}}{l} = \frac{1595}{3} = 532 \text{ Вт/м.}$$

Контрольные вопросы

1 Как формулируется первый закон термодинамики для проточной системы (уравнение энергии газового потока)?

2 Что такое энтропия и как анализ изменения энтропии изолированной системы позволяет определить направление самопроизвольного термодинамического процесса?

3 В чем принципиальное отличие обратимого термодинамического процесса от необратимого? Приведите два примера необратимых процессов.

5 Лабораторная работа № 5. Циклы энергетических установок. Теплообмен. Решение типовых задач

Цель работы: научиться анализировать и рассчитывать термодинамические циклы энергетических установок с определением их термического КПД и удельных расходов; получить практические навыки решения типовых задач по основам теплообмена.

5.1 Теоретическая часть

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.

5.2 Практическая часть

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 $\nu = 14{,}16\cdot10^{-6}$ м^2/с, $\lambda = 2{,}51\cdot10^{-2}$ Вт/(м·°С).

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega_0 \cdot l_0}{\nu} = \frac{80\cdot 1{,}0}{14{,}16\cdot10^{-6}} = 5{,}65\cdot10^6 < 5\cdot10^5.$$

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

$$Nu = 0{,}032\cdot\left(5{,}65\cdot10^6\right)^{0{,}8} = 8050.$$

$$\alpha = Nu\cdot\frac{\lambda}{l_0} = 8050\cdot\frac{2{,}51\cdot10^{-2}}{1{,}0} = 202 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°С)}.$$

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

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

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 $Re_x = 5{,}65\cdot10^6$, $Nu_x = 0{,}255\cdot(5{,}65\cdot10^6)^{0{,}8} = 6280$ 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 $\alpha_f = 21{,}4 \cdot 10^{-6}$ м^2/с;
– коэффициент теплопроводности λ_f = 0,0261 Вт/(м·град);
– коэффициент кинематической вязкости $\nu_f = 15{,}06 \cdot 10^{-6}$ м^2/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):

$$\overline{Nu}_{f,l} = 0{,}037 \cdot Re_{f,l}^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}. \; Re_{f,l} = \frac{\omega \cdot l}{\nu_f} = \frac{30 \cdot 0{,}72}{15{,}06 \cdot 10^{-6}} = 1{,}43 \cdot 10^6.$$

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 $\alpha_w = 33{,}64 \cdot 10^{-6}$ м^2/с;
– коэффициент кинематической вязкости $\nu_w = 23{,}13 \cdot 10^{-6}$ м^2/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

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

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

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

Контрольные вопросы

1 Что такое термический коэффициент полезного действия (КПД) термодинамического цикла и как он выражается через подведенную и отведенную теплоту?

2 Опишите основные процессы, составляющие прямой цикл Карно, и запишите формулу его максимально возможного КПД.

3 Назовите три основных вида теплообмена, существующих в природе, и кратко объясните физический механизм каждого из них.

6 Лабораторная работа № 6. Теплопроводность и теплопередача при стационарном режиме. Теплопроводность при нестационарном режиме

Цель работы: освоить методику расчета температурных полей и тепловых потоков через плоские и цилиндрические стенки в стационарном режиме; изучить физические основы и методы приближенного расчета нестационарной теплопроводности.

6.1 Теоретическая часть

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

$$q_k = \alpha_k \cdot (t_Г - t_C).$$

Лучистую теплоотдачу определяют по формуле

$$q_л = \varepsilon_{пр} \cdot C \cdot \left(\left(\frac{T_Г}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C}{100} \right)^4 \right).$$

Складывая этих два количества тепла, получим уравнение

$$q = q_k + q_Л = \alpha_k \cdot (t_Г - t_C) + \varepsilon_{ПР} \cdot C_0 \cdot \left(\left(\frac{T_Г}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C}{100} \right)^4 \right).$$

Если преобладает конвективный теплообмен, то целесообразно уравнение привести к виду

$$q = \left\{ \alpha_k + \varepsilon_{ПР} \cdot C_0 \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_Г}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C}{100} \right)^4}{t_Г - t_C} \right] \right\} \cdot (t_Г - t_C).$$

Часто в расчетах при сложном теплообмене пользуются суммарным коэффициентом теплоотдачи, представляющим собой сумму коэффициентов конвективной теплоотдачи $\alpha_л$. Тогда

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_Л.$$

В этом случае формула для теплового потока имеет вид

$$q = (\alpha_k + \alpha_Л) \cdot (t_Г - t_C) = \alpha \cdot (t_Г - t_C).$$

Значение $\alpha_л$ находят по формуле

$$\alpha_Л = \varepsilon_{пр} \cdot C_0 \cdot B,$$

где B – температурный коэффициент,

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

6.2 Практическая часть

Задача 1. Между двумя параллельно расположенными пластинами (абсолютно черными) происходит теплообмен излучением и теплопроводностью. Температура пластин T_1 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 и 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

Контрольные вопросы

1 Сформулируйте основной закон теплопроводности (закон Фурье) и объясните физический смысл коэффициента теплопроводности материала.

2 Как рассчитывается общее термическое сопротивление теплопередачи для однослойной плоской и однослойной цилиндрической стенки?

3 В чем заключается главная особенность нестационарного режима теплопроводности и какие параметры температурного поля изменяются во времени при этом режиме?

7 Лабораторная работа № 7. Свободная тепловая конвекция в неограниченном пространстве. Свободная тепловая конвекция в ограниченном пространстве. Расчет конвективного теплообмена в помещении

Цель работы: сформировать навыки расчета коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции с использованием критериальных уравнений подобия; научиться оценивать конвективный теплообмен в реальных условиях (например, теплопотери или нагрев в помещении).

7.1 Теоретическая часть

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)

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

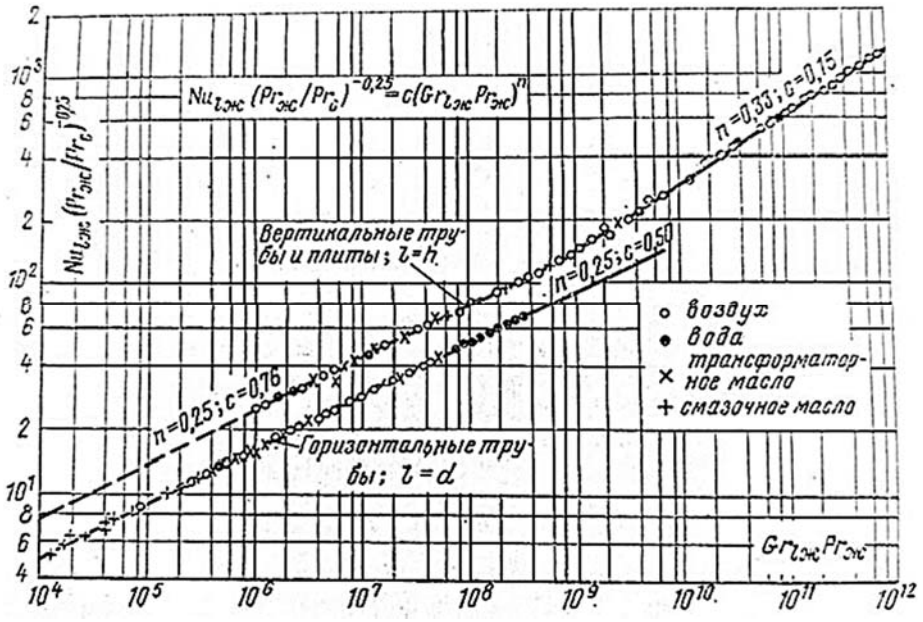
Для вертикальных поверхностей (трубы, пластины):

– при $10^3 < \left(Gr_{c,h} \cdot \mathrm{Pr}_c \right) < 10^9$ (ламинарный режим)

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

– при $\left(Gr_{c.h} \cdot \mathrm{Pr}_c \right) > 10^9$ (турбулентный режим)

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



1 – для вертикальных труб и плит; *2* – для горизонтальных труб

Рисунок 7.1 – Теплоотдача при свободном движении различных жидкостей

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 $\left(Pr_c / Pr_П\right)^{0,25}$ 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 $\left(Pr_c / Pr_П\right)^{0,25} > 1$, а при охлаждении $\left(Pr_c / Pr_П\right)^{0,25} < 1$. 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 $\left(Pr_c / Pr_П\right)^{0,25} = 1$ и все приведенные расчетные формулы упрощаются.

7.2 Практическая часть

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 $t_c = 20\ ^\circ\text{C};\ \lambda_c = 0{,}0259\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot{}^\circ\text{C});\ \nu_c = 15{,}0\cdot10^{-6}\ \text{м}^2/\text{с};\ Pr_c = 0{,}7;$ $Pr_c / Pr_{П} = 1.$

При этих данных число Грасгофа

$$Gr_{c,h} = \frac{\beta\cdot g\cdot h^3\cdot\Delta t}{\nu^2} = \frac{9{,}81\cdot4^3\cdot(60-20)\cdot10^{12}}{293\cdot15{,}0^2} = 0{,}38\cdot10^{12}.$$

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

$$Nu_{c,d} = 0{,}15\cdot\left(Gr_{c,h}\cdot Pr_c\right)^{0{,}33}\cdot\left(\frac{Pr_C}{Pr_{П}}\right)^{0{,}25} = 0{,}15\cdot\left(0{,}266\cdot10^{12}\right)^{0{,}33} = 885.$$

Тогда

$$\alpha = \frac{Nu_{c,h}\cdot\lambda_c}{h} = \frac{885\cdot0{,}0259}{4} = 5{,}73\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot{}^\circ\text{C}).$$

Искомое количество теплоты

$$Q = \alpha\cdot F\cdot(t_n - t_c) = 5{,}73\cdot3{,}14\cdot0{,}05\cdot4\cdot40\cdot3600 = 518\ \text{кДж}.$$

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

Решение

Имеем

$$Gr_{c,d} = \frac{\beta g\Delta t}{\nu_2} = \frac{9{,}81\cdot0{,}05^3\cdot(60-20)\cdot10^{12}}{293\cdot15{,}0^2} = 7{,}45\cdot10^5;$$

$$Gr_{c,d}\cdot Pr_c = 7{,}45\cdot10^5\cdot0{,}7 = 5{,}21\cdot10^5.$$

По формуле определим

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

Тогда

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

Количество переданной теплоты

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

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

Задача 3. Определить потери теплоты за 1 ч через оконный проем размерами 0,8 × 1,4 м, если расстояние между рамами δ = 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

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

Находим

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

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

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

Коэффициент конвекции найдем по формуле

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

Эквивалентный коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{эк} = \varepsilon_K \cdot \lambda = 9,0 \cdot 0,025 = 0,222 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}.$$

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 $t_{ж}$ = 20 °С.

Решение

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

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

где за определяющий размер принимается высота плиты H.

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

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

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

При этих условиях значение комплекса

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

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

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

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

Задача 5. Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности и плотность теплового потока q, Вт/м^2, через вертикальную щель толщиной δ = 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

$$\lambda_{ж} = \lambda \cdot \varepsilon_{k},$$

где λ – действительный коэффициент теплопроводности жидкости;

$\varepsilon_{к}$ – коэффициент конвекции, являющийся функцией $(Gr \cdot Pr)$, может быть приближенно вычислен по формуле

$$\varepsilon_{k} = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}_{С.Г}.$$

Здесь все физические параметры выбираются при определяющей

температуре $t_{C.Г} = 0{,}5(t_{c1} + t_{c2})$.

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

В рассматриваемом случае $t_{C.Г} = 0{,}5\cdot(200 + 80) = 140$ °С. При этой температуре $\nu_{C.Г} = 27{,}8\cdot10^{-6}$ м^2/с; $\lambda_{C.Г} = 0{,}0349$ Вт/(м·°С); $Pr_{C.Г} = 0{,}684$;

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

Вычисляем

$$(Gr\cdot Pr)_{C.Г} = g\cdot\beta_{C.Г}\frac{(t_{c1} - t_{c2})\cdot\delta^3}{\nu^2}\cdot Pr_{C.Г} = 9{,}81\cdot\frac{120\cdot(2\cdot10^{-2})^3}{413\cdot(27{,}8\cdot10^{-6})^2}\cdot0{,}684 = 2{,}02\cdot2\cdot10^4.$$

Коэффициент конвекции

$$\varepsilon_k = 0{,}18\cdot(2{,}02\cdot10^4)^{0{,}25} = 2{,}14,$$

тогда

$$\lambda_э = 3{,}49\cdot10^{-2}\cdot2{,}14 = 7{,}47\cdot10^{-2}\ \text{Вт/(м}^2\cdot\text{°С)}$$

Плотность теплового потока через воздушную прослойку

$$q = \frac{\lambda_э}{\delta}\cdot(t_{c1} - t_{c2}) = \frac{7{,}47\cdot10^{-2}}{0{,}02}\cdot120 = 448\ \text{Вт/м}^2.$$

Контрольные вопросы

1 Что такое свободная (естественная) конвекция и какие силы вызывают движение жидкости или газа при этом виде теплообмена?

2 Какие основные критерии подобия (числа Грасгофа, Прандтля, Нуссельта) используются при расчете свободной конвекции и какой физический смысл они несут?

3 Как влияет ориентация и геометрия обогреваемой поверхности (вертикальная, горизонтальная, наличие ограничивающих стенок) на интенсивность свободного конвективного теплообмена?

8 Лабораторная работа № 8. Расчет теплопроводности твердых поверхностей. Расчет лучистого теплообмена между поверхностями

Цель работы: освоить расчет лучистого теплообмена между твердыми поверхностями с учетом их оптических свойств (степени черноты); научиться оценивать суммарный теплообмен (конвекция + излучение) от поверхностей твердых тел в окружающую среду.

8.1 Теоретическая часть

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^2·град);

F – поверхность теплообмена в аппарате, м;

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 $V_1 \cdot \rho_1$, V_2 ρ_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.

8.2 Практическая часть

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

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

Давление воздуха $\rho = 0{,}1$ МПа. Количество подогреваемого воздуха $V_в$ = 1,67 м^3/с = 6000 м^3/ч; коэффициент теплопередачи от газов к воздуху k = 15 Вт/(м^2·град).

Решение

Количество тепла, передаваемое от газов к воздуху,

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

где $C'_в$ – средняя объемная изобарная теплоемкость воздуха, $C'_в = 1{,}323$ кДж/(м^2 · град).

Среднюю логарифмическую разность температур при прямотоке найдем по формуле

$$\Delta t_{\rightrightarrows} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \dfrac{\Delta t_б}{\Delta t_м}} = \frac{(510 - 30) - (320 - 200)}{2{,}31 \cdot \ln \dfrac{510 - 30}{320 - 200}} = 260 \text{ °С}.$$

Необходимая поверхность нагрева воздухоподогревателя

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

Средняя логарифмическая разность при противотоке

$$\Delta t_{\rightrightarrows} = \frac{(510 - 200) - (320 - 30)}{2{,}31 \cdot \ln \dfrac{510 - 200}{320 - 30}} = 297 \text{ °С}.$$

Необходимая поверхность нагрева воздухоподогревателя

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

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

Контрольные вопросы

1 Запишите закон Стефана – Больцмана для излучения абсолютно черного тела и дайте определение понятию «степень черноты» реального тела.

2 Что такое приведенный коэффициент излучения и как он используется при упрощенном расчете лучистого теплообмена между двумя параллельными плоскими стенками?

3 Как рассчитывается суммарный коэффициент теплоотдачи от твердой поверхности в окружающую среду, если одновременно происходит конвективный и лучистый теплообмен?

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.