

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«Санкт-Петербургский государственный университет**  
**промышленных технологий и дизайна»**  
**Высшая школа технологии и энергетики**  
**Кафедра промышленной теплоэнергетики**

# **ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

## **Практические занятия**

Методические указания для студентов всех форм обучения  
по направлению подготовки  
13.04.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Составитель  
В. А. Суслов

Санкт-Петербург  
2025

Утверждено  
на заседании кафедры ПТЭ  
21.04.2025 г., протокол № 8

Рецензент В. С. Куров

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Тепломассоперенос в элементах теплотехнического оборудования» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». В настоящих методических указаниях предоставлен порядок изучения дисциплины, выполнения контрольных работ и подготовки к контролю усвоения дисциплины. Методические указания содержат расчетные задания по разделам теплопроводности, конвективной теплоотдачи, тепломассообмена, теплового излучения, теплового и гидродинамического расчета теплообменных аппаратов.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы магистров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД  
в качестве методических указаний

Редактор и корректор М. Д. Баранова  
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2024 г. поз. 5288

---

Подписано к печати 02.09.2025.	Формат 60x84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ. л. 1,9.	Уч-изд. л. 1,9.
Тираж 30 экз.	Изд. № 70.	Цена «С». Заказ №

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,  
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Тема 1. Передача теплоты теплопроводностью .....	5
Тема 2. Передача теплоты конвекцией .....	6
Тема 3. Теплоотдача при изменении агрегатного состояния вещества .....	10
Тема 4. Передача тепла лучеиспусканием.....	11
Тема 5. Расчет теплообменных аппаратов.....	13
Контрольное задание № 1.....	14
Контрольное задание № 2 .....	16
Контрольное задание № 3 .....	17
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	20
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	21

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При изучении курса «Основы тепломассообмена», «Тепломассоперенос в элементах теплотехнического оборудования» рекомендуется придерживаться следующего порядка. Для начала необходимо в соответствии с программой ознакомиться с содержанием, представленными в методических указаниях темами, а затем изучать материал по рекомендованным пособиям. При изучении материала следует обращать внимание на физический смысл рассматриваемого явления и сопровождающего его соответствующими формулами.

При выполнении контрольных работ необходимо выполнять следующие правила:

1. Переписывать полностью текст каждой задачи.
2. Указывать словами, какая величина вычисляется, приводить соответствующую формулу.
3. Каждую задачу необходимо сопровождать схемой, поясняющей условие задачи и расчет.
4. Для каждой найденной величины следует указывать размерность.
5. В тексте решения задачи необходимо придерживаться терминов и обозначений, принятых в учебных пособиях.
6. Для значений физических величин, которые берутся из таблиц или диаграмм, необходимо назвать источник с указанием его автора и года издания. Большинство значений физических величин представлено в приложении настоящих методических указаний.
7. Контрольные работы следует писать разборчиво, оставляя поле для замечаний рецензента; графики и схемы выполнять тщательно и аккуратно.
8. Выбор варианта задания производится по последней цифре шифра зачетной книжки студента.
9. Пояснительная записка оформляется без рамок и штампов.
10. Пояснительная записка [1, 2] должна быть напечатана с использованием компьютера и принтера на одной стороне листов белой бумаги формата А4 с применением текстового редактора Microsoft Word.

Рекомендуется использовать:

- гарнитуру шрифта Times New Roman;
  - размер шрифта – 14 кегль;
  - межстрочный интервал текста – 1,5;
  - выравнивание – двухстороннее;
  - размеры полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм;
  - равный по всему тексту документа абзацный отступ – 5 знаков (1,25).
11. Нумерация страниц осуществляется внизу по центру, начиная с 3 или 4 стр. (Содержание).

## ВВЕДЕНИЕ

Теория тепло- и массообмена представляет собой один из важнейших разделов технической физики. Она базируется на таких дисциплинах, как физика, термодинамика, динамика жидкости и газов.

Вопросы тепло- и массообмена в инженерных разработках занимали и будут приобретать все большее значение, поскольку решение многих задач промышленности страны, в частности, химической технологии, энергетики, авиационной техники, судостроения, коммунального хозяйства неразрывно связано с теорией теплообмена.

Перенос теплоты осуществляется тремя основными способами: **теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.**

Литература: [3, Введение].

## Т Е М А 1. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

**Теплопередача или теплообмен** – это учение о самопроизвольных и необратимых процессах распространения теплоты в пространстве, обусловленных неоднородным температурным полем.

**Температурным полем** называется совокупность мгновенных значений температуры в объеме тела или системы тел для каждого рассматриваемого момента времени:  $t = f(x, y, z, \tau)$ , где  $t$  – температура;  $x, y, z$  – пространственные координаты;  $\tau$  – время.

Температурное поле, в котором температура зависит от времени, называется **нестационарным**. При установившемся тепловом режиме, когда температурное поле не зависит от времени,  $dt/d\tau = 0$ , температурное поле называется **стационарным**.

Скорость изменения температуры по нормали к изотермической поверхности характеризуется **градиентом температуры** – вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равным производной от температуры по этому направлению:  $grad t = \vec{n}_0 \frac{\partial t}{\partial n}$ , где  $n_0$  – единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры. Основным закон теплопроводности формулируется **уравнением Фурье**:  $q = -\lambda grad t = -\lambda \cdot n_0 \frac{\partial t}{\partial n}$ . Множитель пропорциональности,  $\lambda$  [Вт/(м·К)] называется **коэффициентом теплопроводности** и является физическим параметром вещества. Для газов  $\lambda = 0,006 - 0,6$  [Вт/(м·К)].  $\lambda$  жидкостей =  $0,07 - 0,7$  [Вт/(м·К)]. У строительных материалов  $\lambda = 0,023 - 2,9$ . Материалы, имеющие  $\lambda < 0,25$ , относят к **теплоизоляционным**. Дифференциальное уравнение теплопроводности записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{1}{c \cdot \rho} \operatorname{div} \bar{q} + \frac{q_v}{c \cdot \rho} = \frac{1}{c \cdot \rho} \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} t) + \frac{q_v}{c \cdot \rho}.$$

Плотность теплового потока через многослойную плоскую стенку определится как:

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})]$$

Тепловой поток  $Q$  [Вт], через поверхность  $F$  твердой стенки равен:

$$Q = q \cdot F = k \cdot \Delta t \cdot F.$$

Температуры поверхностей стенки находятся по формулам:

$$t_{c1} = t_{ж1} - q \frac{1}{\alpha_1}; \quad t_{c2} = t_{ж1} - q \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} \right); \quad t_{c2} = t_{ж2} + q \frac{1}{\alpha_2}.$$

Линейная плотность теплового потока через многослойную цилиндрическую поверхность определяется уравнением:

$$q_\ell = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} = K_\ell \cdot \pi(t_{ж1} - t_{ж2}),$$

где  $\frac{1}{K_\ell} = R_\ell = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}$  – полное термическое сопротивление многослойной цилиндрической стенки. Температуры соприкосновения слоев

определяются согласно формуле:  $t_{c(i+1)} = t_{ж1} - \frac{q_\ell}{\pi} \left( \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right)$ .

Критический диаметр изоляции цилиндрической поверхности определяется уравнением:  $d_{кр.из} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_2}$ .

Теплопроводность шаровой стенки определяется уравнением

$$Q = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}} = K_{ш} \pi \cdot \Delta t,$$

где  $K_{ш}$  – коэффициент теплопередач шаровой стенки, [Вт/(м<sup>2</sup> · К)].

Литература: [3, главы I, II, III].

## Т Е М А 2. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ КОНВЕКЦИЕЙ

Теплообмен между движущейся средой и поверхностью твердого тела называется **конвективным теплообменом** или **теплоотдачей**. Конкретные характеристики движения текущих жидкостей определяются **кривой течения** и **режимом течения**. В качестве теплоносителей в технике применяются разнообразные вещества: воздух, вода, масла, нефть, спирты, ртуть, расплавленные металлы и др. Особенности жидкости как теплоносителя определяются ее физическими свойствами. Большое влияние оказывают

коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , удельная теплоемкость  $C_p$ , плотность  $\rho$ , коэффициент температуропроводности  $a$ , вязкость жидкости  $\mu$ ,  $\nu$ . Имеет значение в процессе теплообмена форма и размеры теплоотдающих поверхностей.

Решение системы дифференциальных уравнений теплообмена средствами математического анализа связано с большими трудностями, иногда непреодолимыми. Преодолеть эти трудности позволяет теория подобия. Для выделения конкретно рассматриваемого процесса из бесчисленного множества, описываемого полученными дифференциальными уравнениями, к ним добавляются условия однозначности, которые состоят из:

- 1) геометрических условий;
- 2) физических условий;
- 3) временных или начальных условий;
- 4) граничных условий.

Основные положения теории подобия формулируются в виде трех теорем.

**1.** Подобные между собой явления имеют одинаковые критерии подобия. Теорема устанавливает связь между константами подобия и позволяет выявить критерии подобия: запись дифференциальных уравнений должна быть одинаковой.

**2.** Условия однозначности подобных процессов должны быть одинаковыми во всем, кроме числовых значений размерных постоянных, содержащихся в этих условиях: теорема позволяет сократить число переменных в задачах теплообмена.

Из **1** и **2** теорем следует, что подобные процессы должны описываться одинаковыми безразмерными дифференциальными уравнениями и безразмерными граничными условиями.

**3.** Подобны те явления, которые имеют подобные условия однозначности и одинаковые определяющие критерии.

Если жидкость находится в поле силы тяжести, то наличие неоднородного поля плотностей вызывает появление результирующих подъемных сил, приводящих жидкость в движение, которое называют **гравитационной свободной конвекцией**. Критериальное уравнение теплообмена при свободной конвекции имеет вид:  $Nu = C (Gr \cdot Pr)_m^n$ . Уравнение применимо для любых капельных и упругих жидкостей при  $Pr \geq 0,7$  для тел любых форм и размеров. За определяющую температуру взята средняя температура пограничного слоя:  $t_m = 0,5(t_{жс} + t_c)$ . За определяющий размер для труб и шаров – диаметр, для вертикальных плит – их высота, для горизонтальных плит – их меньшая сторона. Для горизонтальных плит  $\alpha$  увеличивается на 30 %, если нагретая сторона обращена вверх.

Для практических расчетов тепловой поток через прослойки толщиной  $\delta$  рассчитывается по уравнению теплопроводности:  $q = \frac{\lambda_{\text{эКВ}}}{\delta} (t_{c1} - t_{c2})$ , где  $\lambda_{\text{эКВ}}$  – эквивалентная теплопроводность, учитывающая конвективный перенос

теплоты;  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  – температуры горячей и холодной поверхностей, разделенных прослойкой;  $\lambda_{\text{ЭКВ}} = \varepsilon_k \cdot \lambda_{\text{ж}}$ , где  $\varepsilon_k$  – коэффициент, учитывающий влияние конвекции:  $\varepsilon_k = f(Gr \cdot Pr)$ , может быть взят [1].

**Течение жидкости в трубах** классифицируют на ламинарное и турбулентное в зависимости от значения числа  $Re$ :  $Re = \frac{\bar{w} \cdot d}{\nu}$ , где  $\bar{w}$  – средняя скорость жидкости. При  $Re < Re_{\text{кр}} \approx 2000$  – течение ламинарное.  $Re_{\text{кр}1}$  – нижнее критическое число  $Re$ . В случае  $Re > 2000$  и возмущении потока, ламинарный режим течения нарушается. Развитое турбулентное течение устанавливается при  $Re > Re_{\text{кр}2} \sim 10^4$ . Течение при  $Re = 2 \cdot 10^3 \div 10^4$  называют переходным. При движении у стенок трубы образуется гидродинамический пограничный слой, толщина которого непрерывно возрастает. На определенном расстоянии от входа пограничный слой заполняет все поперечное сечение. Расстояние от входа в трубу до слияния пограничных слоев называется длиной гидродинамического начального участка или участком гидродинамической стабилизации  $l_{\text{н}}$ . Длина гидродинамического начального участка зависит от  $Re$ , степени турбулентности потока на входе и других факторов. При  $Re > 5 \cdot 10^4$  – начиная с входа в трубу, развивается турбулентный пограничный слой, с ламинарным подслоем на стенке трубы. При наличии теплообмена в трубе, начиная от входного сечения, образуется тепловой пограничный слой, толщина которого постоянно увеличивается. Через определенное расстояние  $l_{\text{н.т}}$  тепловой пограничный слой заполняет все сечение трубы, где  $l_{\text{н.т}}$  – участок термической стабилизации или начальный тепловой участок. При  $x > l_{\text{н.т}}$  – теплообмен считают стабилизированным.

Приближенная оценка среднего коэффициента теплоотдачи для ламинарного режима может быть получена по зависимости:

$$Nu_{\text{жд}} = 0,15 Re_{\text{жд}}^{0,33} Pr_{\text{жд}}^{0,33} (Gr_{\text{жд}} \cdot Pr_{\text{ж}})^{0,1} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25} \varepsilon_{\ell},$$

где определяющей температурой является средняя температура жидкости в трубе:  $t_{\text{ж}} = 0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}})$ ; определяющий размер – внутренний диаметр трубы.  $\varepsilon_{\ell}$  – поправка на длину трубы. При  $l/d > 50$  –  $\varepsilon_{\ell} = 1$ . При  $l/d < 50$  значения поправки выбираются по справочной литературе [1].

При турбулентном режиме интенсивность теплоотдачи рассчитывается по зависимости:  $Nu_{\text{жд}} = 0,021 Re_{\text{жд}}^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,43} (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{с}})^{0,25} \varepsilon_{\ell}$ . При  $l/d > 50 \rightarrow \varepsilon_{\ell} = 1$ . При  $l/d < 50 \rightarrow \varepsilon_{\ell} \approx 1 + \frac{2}{l/d}$ . Определяющая температура -  $t_{\text{ж}} = 0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}})$ .

Определяющий размер – эквивалентный диаметр:  $d_3 = \frac{4f}{\Pi}$ .

**Поперечное** и плавное, безотрывное **обтекание** цилиндра существует до  $Re = 5 = \frac{w_0 \cdot d}{\nu}$ , где  $w_0$  – скорость набегающего потока,  $d$  – внешний диаметр.



При  $Re > 5$  пограничный слой, образующийся на передней половине трубы, в кормовой части отрывается от поверхности и позади цилиндра образуются два симметричных вихря. Вихри периодически отрываются от трубы и уносятся потоком жидкости, образуя вихревую дорожку. Отрыв пограничного слоя происходит из-за снижения скорости в кормовой части трубы ( $\varphi > 90^\circ$ ), повышения вследствие этого статического давления, под действием которого возникают возвратные течения, оттесняющие пограничный слой с поверхности тела. При высоких числах  $Re$ , рост статического давления приводит не к отрыву, а к переходу режима течения в слое в турбулентное, обладающего большей кинетической энергией. Расчетные зависимости по теплоотдаче обобщены А. Жукаускасом:

$$5 < Re < 10^3 \quad \rightarrow \quad Nu_{ж} = 0,5 Re_{ж}^{0,5} Pr_{ж}^{0,38} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25};$$

$$10^3 < Re < 2 \cdot 10^5 \quad \rightarrow \quad Nu_{ж} = 0,25 Re_{ж}^{0,6} Pr_{ж}^{0,38} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25};$$

$$Re = 2 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6 \quad \rightarrow \quad Nu_{ж} = 0,023 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,38} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

В представленных уравнениях определяющий линейный размер –  $d$ . Скорость взята в узком сечении канала. Определяющая температура:  $t_{ж} = 0,5(t_{вх} + t_{вых})$ .

В промышленности трубы используются в пучках, которые классифицируются как **коридорные** и **шахматные**. Омывание первого ряда труб шахматного и коридорного пучков аналогично омыванию одиночного цилиндра. Характер омывания остальных труб зависит от типа пучка. Трубы второго и последующего рядов коридорного пучка находятся в вихревой зоне, образованной впереди стоящими трубками. Однако основной поток проходит в продольных коридорах между рядами. Поэтому как лобовая, так и кормовая часть труб коридорного пучка омываются с меньшей интенсивностью по сравнению с аналогичными трубками первого ряда. Характер омывания труб шахматного пучка практически аналогичен трубкам первого ряда.

$\alpha_{ср}$  третьего ряда пучка может определяться согласно зависимости:

$$Nu_{ж} = c Re_{ж}^n Pr_{ж}^{0,33} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_s.$$

Для шахматных пучков:  $c = 0,41$ ;  $n = 0,6$ . Для коридорных пучков:  $c = 0,26$ ;  $n = 0,65$ .  $\varepsilon_s$  – учитывает влияние относительных шагов:  $S_1/d$  – относительный поперечный и  $S_2/d$  – относительный продольный шаги.  $\varepsilon_s = (S_2/d)^{-0,15}$  – для коридорного;  $\varepsilon_s = (S_1/S_2)^{1,6}$  при  $S_1/S_2 < 2$  для шахматного и при  $S_1/S_2 \geq 2$ :  $\varepsilon_s = 1,12$ . Определяющий размер – внешний диаметр. Скорость жидкости берется по узкому сечению пучка. Определяющая температура – средняя температура жидкости:  $t_{ж} = 0,5(t_{вх} + t_{вых})$ .

Средний для пучка труб коэффициент теплоотдачи определяется как:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + (n-2)\alpha_3}{n}.$$

Литература: [3, гл.IV, V, VI].

### Т Е М А 3. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

1. Теплообмен при пузырьковом кипении жидкости в большом объеме в области развитого пузырькового кипения может быть рассчитан по следующим зависимостям:

По критериальному уравнению Н. Г. Стюшина:

$$Nu_{исп} = A \left[ Pe_{исп} \cdot k_t^{0.63} \cdot k_\sigma^{0.5} \right]^n,$$

где 
$$Pe_{исп} = \frac{w_{исп} \cdot l_0}{a} = \frac{q}{r \cdot \rho'' \cdot a} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}};$$

$k_t = [r/(c_p \cdot t_s)](\rho''/\rho')[\rho''/(\rho' - \rho'')]\{r/[g(\sigma/g(\rho' - \rho''))]^{0.5}\}$ ;  $r$  – теплота парообразования;  $w_{исп}$  – скорость испарения;  $a$  – коэффициент температуропроводности;

$l_0$  – характерный размер парового пузыря;  $\rho'$  и  $\rho''$  – плотности жидкости и пара соответственно;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $g$  – ускорение свободного падения.

При  $N = Pe_{исп} \cdot k_t^{0.63} \cdot k_\sigma^{0.5} \geq 10^7 \rightarrow A = 3,2 \cdot 10^{-5}; n = 0,75;$

при  $5 \cdot 10^5 < N < 10^7 \rightarrow A = 2,65 \cdot 10^{-2}; n = 1/3;$

По параметрическим формулам:

$$\alpha = 3,0 \cdot q^{0,7} p^{-1,5}; \quad \alpha = 38,7 \Delta t^{2,33} p^{0,5}.$$

2. Теплообмен при кипении в условиях направленного движения восходящего потока может быть рассчитан по зависимости Л. С. Стермана:

$$\frac{Nu_{кип}}{Nu_{б.к}} = 6150 \cdot N^{0,7},$$

где 
$$N = \frac{q}{r \cdot \rho'' \cdot w} \left( \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{1,45} \left( \frac{r}{c_p \cdot T_n} \right)^{0,333}.$$
 При  $N \leq 0,4 \cdot 10^{-5} \rightarrow Nu_{кип} = Nu_{б.к};$

$Nu_{б.к}$  – рассчитывается по уравнениям для течения однофазной жидкости.

3. Теплообмен при кипении гравитационно-стекающего двухфазного потока в вертикальных трубах может быть рассчитана по уравнению Г. И.

Гимбутиса: 
$$Nu_{м.ж} = (0,165 Re_{ж}^{0,16} - 0,4) Pr_{ж}^{0,34} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_a,$$
 где 
$$Nu_{м.ж} = \frac{\alpha}{\lambda} \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3}$$
 –

модифицированное число Нуссельта,  $\varepsilon_a = 0,8 \div 1,0$  – поправочный коэффициент.

Уравнение справедливо при  $Re > Re_{кр}$ .  $Re_{кр} = 2200 Pr^{-0,3}$ .

4. Процесс теплообмена при конденсации чистого пара представляет собой переход пара в жидкое состояние. Конденсация насыщенного или перегретого пара на твердой поверхности теплообмена происходит, если температура поверхности меньше температуры насыщения при данном давлении. На поверхности может образоваться пленка конденсата. Такой вид конденсации называется пленочной. Пленочная конденсация имеет место, если конденсат смачивает поверхность теплообмена. Если же конденсат не смачивает поверхность, то она покрывается отдельными каплями конденсата – капельная конденсация.

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара  $\alpha$  рассчитывается по зависимости Д. А. Лабунцова:  $\alpha = \frac{Re}{\Delta t \cdot x \cdot B}$

Число  $Re$  рассчитывается в зависимости от режима течения конденсатной пленки, определяющейся по значению приведенной длины трубы  $Z$ :

$z = \Delta t \cdot x \left( \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} \frac{\lambda'}{r \cdot \rho' \cdot \nu'}$ , где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\nu'$  и  $\lambda'$  –

коэффициенты кинематической вязкости и теплопроводности конденсата соответственно;  $r$  – теплота парообразования;  $\rho'$  – плотность конденсата;

$\Delta t = t_n - t_c$  – температурный напор;  $\frac{g \cdot x^3}{\nu^2} = Ga$ ;  $A = \left( \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} \cdot \frac{\lambda}{r \cdot \rho' \cdot \nu}$ . Тогда

$z = \Delta t \cdot x \cdot A$ . Физические параметры конденсата определяются по температуре насыщения. Для вертикальных труб  $x = H$ .

При  $z < 2300$ , что соответствует  $Re < 400$ , режим течения конденсатной пленки ламинарный и  $Re = 0,95 z^{0,78} \varepsilon_t$ .

Для вертикальных труб расчетное уравнение теплоотдачи при конденсации насыщенного пара в условиях ламинарного течения пленки может быть записано в параметрическом виде (формула Нуссельта):

$$\bar{\alpha} = 0,9434 \sqrt{\frac{r \cdot \rho'^2 \cdot g \cdot \lambda'^3}{\mu' \cdot \Delta t \cdot x}}$$

Литература: [4, гл. VIII, IX].

## Т Е М А 4. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ЛУЧЕИСПУСКАНИЕМ

Тепловое излучение – двойственный процесс распространения внутренней энергии излучающего тела как электромагнитными волнами, так и фотонами. Возбудителями электромагнитных волн являются электроны и ионы, входящие в состав вещества. Колебания ионов соответствуют излучению низкой частоты. Излучение, обусловленное движением электронов, может иметь высокую частоту. В металлах свободные электроны движутся, испытывая нерегулярное торможение, вследствие чего излучение металлов приобретает характер импульсов и имеет волны различной частоты.

Для расчета лучистых потоков важно знать законы излучения Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа и Ламберта. Для расчета лучистого теплообмена между твердыми телами используется уравнение:

$$q_{1,2} = A_n \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = C_n \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], [\text{Вт/м}^2],$$

где  $A_n = \frac{1}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1}$  – приведенный коэффициент поглощения системы;

$$C_n = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \quad \text{– приведенный коэффициент лучеиспускания}$$

системы.

Описанным методом также может быть решена задача лучистого теплообмена между двумя поверхностями в замкнутом пространстве, когда одна из поверхностей обтекает другую. Окончательная расчетная формула имеет следующей вид:  $Q_{1,2} = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot F_p \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \phi_{1,2}$ ,

где  $\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$  – приведенная степень черноты; в качестве

расчетной поверхности принимается меньшая из поверхностей;  $\phi_{1,2}$  – угловой коэффициент – чисто геометрический параметр, определяемый формой поверхностей, их размерами, взаимным расположением и расстоянием между ними. Значения  $\phi_{1,2}$  приводятся в справочной литературе.

Расчетная формула **лучистого теплообмена между газом и оболочкой** имеет следующий вид:

$$q_{г,с} = \mathcal{E}'_c C_0 \left[ \varepsilon_\Gamma \left( \frac{T_\Gamma}{100} \right)^4 - A_\Gamma \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right],$$

где  $\mathcal{E}'_c$  – эффективная степень черноты оболочки,  $\mathcal{E}'_c = 0,5(\mathcal{E}_c + 1)$ .

Если поглощающий газ имеет парциальное давление  $p_\Gamma$ , а смесь имеет полное давление  $p$ , то соотношение находится в форме:

$$\varepsilon_\Gamma = f(p_\Gamma L, p, T_\Gamma).$$

Функция  $f$  определяется как произведение  $f_1 \cdot f_2$ , где функции  $f_1$  и  $f_2$  находятся с помощью номограмм.

Параметр  $p_\Gamma L$  является мерой оптической глубины слоя;  $p$  и  $T_\Gamma$  учитывают изменения в диапазонах поглощения в зависимости от давления и температуры.

Для труб, расположенных по вершинам равностороннего треугольника, длина пути луча находится по зависимости:

$$l = 1,08d \left( \frac{s_1 s_2}{d^2} - 0,785 \right), \text{ где } s_1 = x + d; s_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}(x + d).$$

Величина  $A_\Gamma$  выражается через  $\varepsilon_\Gamma$

$$A_\Gamma = \left( \frac{T_\Gamma}{T_{ст}} \right)^{1/2} \cdot \varepsilon_\Gamma \left( pL \frac{T_{ст}}{T_\Gamma}, p, T_{ст} \right).$$

Литература: [4, гл. XI].

## Т Е М А 5. РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Для выполнения контрольных работ необходимо знать основные положения теплового расчета. В его основе лежат уравнения теплового баланса и теплопередачи. Для установившегося теплового режима при постоянном давлении уравнение теплового баланса запишется в виде

$$Q = G_1 \cdot \Delta i_1 \cdot \eta_{\text{ап}} = G_2 \cdot \Delta i_2,$$

где  $\Delta i$  – перепад энтальпий, Дж/кг;  $G_{1,2}$  – массовые расходы теплоносителей, кг/с;  $Q$  – количество передаваемой теплоты, Вт;  $\eta_{\text{ап}}$  – коэффициент полезного действия аппарата, учитывающий потери теплоты в окружающую среду.

В общем случае:  $\Delta i_1 = i_1' - i_2''$ ;  $\Delta i_2 = i_2'' - i_2'$ , где  $i_i$  – теплосодержания теплоносителей.

Для определения поверхности теплообмена пользуются уравнением теплопередачи:  $Q = k(\bar{T}_1 - \bar{T}_2)F = k \cdot \Delta T \cdot F$ , где  $k$  – коэффициент теплопередачи;  $\bar{T}_1$  и  $\bar{T}_2$  – средние температуры горячего и холодного теплоносителей;  $\Delta T = \bar{T}_1 - \bar{T}_2 = \Delta t_{\text{ср}}$  – средний температурный напор,  $F$  – площадь поверхности теплообмена.

Как правило, для расчета коэффициента теплопередачи можно использовать следующее выражение:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Для полной поверхности теплообмена используется как при прямотоке, так и при противотоке уравнение для определения  $\Delta \bar{T}$ , которое называют **среднелогарифмическим температурным напором**.

$$\Delta \bar{T} = \frac{\Delta T'' - \Delta T'}{\ln \Delta T'' / \Delta T'} = \frac{\Delta T_b - \Delta T_m}{\ln \Delta T_b / \Delta T_m}.$$

Индексы «б» и «м» – больший и меньший условны, так как при их перестановке результат не меняется. Уравнение среднелогарифмического температурного напора используется как при прямотоке, так и при противотоке.

Литература: [4, гл. XII].

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**, необходимые для ознакомления с курсом, представлены в соответствующих учебно-методических пособиях.

Работа 1. Определение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов методом пластины.

Работа 2. Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении от стенки вертикальной трубы к воздуху.

Работа 3. Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении от стенки горизонтальной трубы к воздуху.

Работа 4. Определение коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления при вынужденном движении воздуха внутри трубы.

Работа 5. Определение коэффициента излучения твердого тела калориметрическим методом.

## КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 1

**Задача 1.** Вычислить секундный расход теплоты ( $Q$ , Вт) через кирпичную стенку высотой  $h$ , длиной  $l$  и толщиной  $\delta$ . Температуры поверхностей стен равны  $t_1$  и  $t_2$ . Данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$h$ , м	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$l$ , м	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	4,0	3,5	5,0	3,0	4,0
$\delta$ , м	0,375	0,375	0,5	0,5	0,375	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$t_1$ , °С	20	18	17	16	16	20	20	10	25	25
$t_2$ , °С	-25	-25	-30	-30	-35	0	0	-30	0	-5

**Задача 2.** Плоская стенка выполнена из шамотного кирпича толщиной  $\delta$ . Температуры ее поверхности равны  $t_1$  и  $t_2$ . Коэффициент теплопроводности шамотного кирпича зависит от температуры и определяется зависимостью  $\lambda = 0,838(1 + 0,0007t)$  Вт/(м·К). Вычислить и изобразить в масштабе распределение температуры в стенке. Данные для расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\delta$ , мм	125	250	375	500	125	250	375	500	125	250
$t_1$ , °С	1000	1100	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550
$t_2$ , °С	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120

**Задача 3.** Стены сушильной камеры выполнены из слоя красного кирпича толщиной  $\delta$  и слоя строительного войлока. Температуры на внешней поверхности кирпичного слоя равны  $t_1$  и на внешней поверхности войлока  $t_2$ . Коэффициенты теплопроводности красного кирпича  $\lambda_1$  и строительного войлока  $\lambda_2$ . Вычислить температуру в плоскости соприкосновения слоев и найти толщину войлочного слоя при условии, чтобы тепловые потери через 1 м<sup>2</sup> стенки не превышал  $q_{\text{пот}}$ . Данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\delta$ , мм	125	250	375	500	125	250	375	500	125	250
$t_1$ , °C	70	75	80	85	90	95	100	110	120	125
$t_2$ , °C	15	20	25	30	35	40	35	30	25	20
$\lambda_1$ , Вт/(м·К)	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
$\lambda_2$ , Вт/(м·К)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03
$q_{\text{пот}}$ , Вт/м <sup>2</sup>	100	105	110	105	100	105	110	105	100	95

**Задача 4.** Вычислить секундный расход теплоты ( $Q$ , Вт) через стенку трубы из жаропрочной стали, имеющей внутренний диаметр  $d_1$ , мм и наружный диаметр  $d_2$ , мм. Температура наружной поверхности трубы  $t_2$ , °C, температура внутренней поверхности  $t_1$ , °C. Данные для расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d_1$ , мм	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$d_2$ , мм	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
$t_1$ , °C	200	250	300	350	400	450	500	550	150	140
$t_2$ , °C	100	150	200	250	300	350	400	400	50	80

**Задача 5.** Паропровод диаметром  $d_1/d_2$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_1$  покрыт изоляцией в два слоя  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Температуры внутренней поверхности трубы  $t_1$  и наружной поверхности изоляции  $t_4$ . Определить потери теплоты через изоляцию с 1 пог. м трубы и температуру на поверхности соприкосновения слоев изоляции, если первый слой изоляции, накладываемый на поверхность трубы, выполнен из материала с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2$ , а второй слой – из материала с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_3$ . Данные для расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d_1/d_2$ , мм	19/22	21/25	24/28	28/32	36/42	42/48	51/57	70/76	83/89	101/108
$\delta_1$ , мм	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$\delta_2$ , мм	18	19	20	22	23	24	25	26	27	28
$t_1$ , °C	200	210	220	230	240	250	260	280	290	300
$t_4$ , °C	20	25	30	35	40	45	50	45	35	30
$\lambda_1$ , Вт/(м·К)	30	35	40	45	50	55	50	45	40	35
$\lambda_2$ , Вт/(м·К)	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,08	0,07	0,06
$\lambda_3$ , Вт/(м·К)	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11

## КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 2

**Задача 6.** По воздуховоду, размером  $h \times b$  движется воздух со скоростью  $w$ . Температура воздуха  $t$ . Определить критерии  $Re$ ,  $Pe$ ,  $Pr$ . Данные для расчета приведены в табл.6.

Таблица 6

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$h$ , мм	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
$b$ , мм	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
$w$ , м/с	10	9	8	7	6	6	5	4	3	1
$t$ , °С	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

**Задача 7.** Для изучения движения воздуха в трубе, диаметром  $d_1$ , со средней скоростью  $w$ , использовали модель с диаметром  $d_2$ . Какую скорость воздуха нужно создать в модели, чтобы осуществить в ней подобие с натурой? Данные для расчета приведены в табл. 7.

Таблица 7

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d_1$ , м	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$w_1$ , м/с	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$d_2$ , м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0

**Задача 8.** Найти потери теплоты с одного погонного метра паропровода, который охлаждается свободным потоком воздуха. Наружный диаметр паропровода равен  $d$ , температура его поверхности  $t_1$ , температура воздуха вдали от паропровода  $t_z$ . Потери теплоты излучением не учитывать. Данные для расчета приведены в табл. 8.

Таблица 8

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d$ , м	0,3	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4
$t_1$ , °С	35	40	45	50	55	60	65	70	40	50
$t_z$ , °С	20	15	10	5	0	10	15	20	5	0

**Задача 9.** Определить средний коэффициент теплоотдачи соприкосновением от поперечного потока дымовых газов к трубам водяного экономайзера парового котла. Трубы расположены в шахматном порядке. Наружный диаметр труб,  $d$  мм, число рядов труб вдоль потока газов равно  $n$ . Шаг труб поперек потока газов,  $x_1 = 95$  мм. Шаг труб вдоль потока,  $x_2 = 75$  мм.



Температура газов перед экономайзером  $t_1$ , после него  $t_2$ . Средняя скорость газов  $w$ . Данные для расчета приведены в табл. 9.

Таблица 9

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d$ , мм	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
$n$	10	15	20	25	30	30	25	20	15	10
$x_1$	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
$x_2$	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
$t_1$ , °C	550	570	590	600	610	620	630	640	650	660
$t_2$ , °C	200	215	230	245	260	275	290	305	320	335
$w$ , м/с	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10

**З а д а ч а 10.** Определить коэффициент теплоотдачи от стенки трубки конденсатора паротурбинной установки к охлаждающей воде, количество передаваемой теплоты и длину трубки, если средняя по ее длине температура стенки  $t_c$ , внутренний диаметр трубки  $d$ , температура воды на входе и выходе из трубки равны, соответственно,  $t_1$  и  $t_2$ . Средняя скорость воды равна  $w$ . Данные для расчета приведены в табл. 10.

Таблица 10

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d$ , мм	14	16	18	20	22	24	26	28	14	16
$t_1$ , °C	10	11	12	13	14	14	13	12	11	10
$t_2$ , °C	18	19	20	21	22	22	21	20	19	18
$t_c$ , °C	25	26	27	28	29	29	28	27	26	25
$w$ , м/с	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9

### КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 3

**З а д а ч а 11.** Найти коэффициент теплоотдачи при кипении воды на трубке испарителя, работающей с плотностью теплового потока  $q$ , если температура поверхности трубки  $t$ , а вода находится при температуре насыщения под давлением  $P$ . Наружный диаметр трубки  $d$ . Данные для расчета приведены в табл. 11.

Таблица 11

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$t$ , °C	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195
$P \cdot 10^{-5}$ , Па	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
$d$ , мм	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40

**Задача 12.** Определить коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к стенке труб вертикального подогревателя, обогреваемого паром, давлением  $P$ . Высота труб подогревателя  $H$ , диаметр трубок  $d$ . Температура стенки трубы  $t$ . Данные для расчета приведены в табл. 12.

Таблица 12

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$P \cdot 10^{-5}$ , Па	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$h$ , м	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5
$d$ , мм	12	14	16	18	20	22	20	18	16	14
$t$ , °C	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105

**Задача 13.** По траншее, выложенной кирпичом, проложен трубопровод горячего воздуха. Температура наружной поверхности стенки трубопровода равна  $t$ . Наружный диаметр трубопровода равен  $d$ . Траншея имеет ширину  $b$  и высоту  $h$ . Температура ее кирпичных стен равна  $t_2$ .

Определить количество теплоты, отдаваемой излучением трубопровода стенам изоляции, отнеся ее к I пог. м трубопровода. Данные для расчета приведены в табл. 13.

Таблица 13

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$t$ , °C	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
$d$ , мм	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
$b$ , м	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$h$ , м	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$t_2$ , °C	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75

**Задача 14.** Дымовые газы проходят пучок труб при средней температуре газов  $t$ . Температура стенок труб  $t_c$ . Состав газовой смеси  $r_{CO_2}$ ,  $r_{H_2O}$ . Трубы расположены в вершинах равностороннего треугольника. Диаметр труб 83 мм. Вычислить количество теплоты, передаваемой излучением, и коэффициент теплоотдачи излучением, если расстояние между поверхностями труб  $x = 83$  мм. Данные для расчета приведены в табл. 14.

Таблица 14

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$t, ^\circ\text{C}$	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850
$t_c, ^\circ\text{C}$	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
$r_{\text{CO}_2}$	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
$r_{\text{H}_2\text{O}}$	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01

**З а д а ч а 15.** Воздух, расходом  $G_2$ , нагревается в трубчатом воздухоподогревателе парового котла от температуры  $t'_в$  до  $t''_в$ . Воздух движется поперек трубного пучка со средней скоростью в узком сечении  $w_в$ . Трубы расположены в шахматном порядке с шагами  $s_1=s_2$ . Дымовые газы (13 %  $\text{CO}_2$ , 11 %  $\text{H}_2\text{O}$ ) в количестве  $G_1$  движутся внутри стальных труб диаметром  $d_2/d_1$  со средней скоростью  $w_г$ . Температура газов на входе в воздухоподогреватель  $t_г$ . Определить необходимую поверхность теплообмена. Данные для расчета приведены в табл. 15.

Таблица 15

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$G_г, \text{кг/с}$	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5
$w_г, \text{м/с}$	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5
$t_г, ^\circ\text{C}$	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430
$s_1=s_2, \text{мм}$	0,9 $d_2$	1,0 $d_2$	1,1 $d_2$	1,2 $d_2$	1,3 $d_2$	1,4 $d_2$	1,5 $d_2$	1,6 $d_2$	1,7 $d_2$	1,8 $d_2$
$G_в, \text{кг/с}$	18,0	18,5	19,0	19,5	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5
$t'_в, ^\circ\text{C}$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
$t''_в, ^\circ\text{C}$	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
$d_2/d_1, \text{мм}$	43/ 40	45/ 42	47/ 44	49/ 46	51/ 48	53/ 50	55/ 52	57/ 54	59/ 56	61/ 58
$w_в, \text{м/с}$	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оформление текстовой части курсовой работы и курсового проекта. Краткая выписка из ГОСТ 7.32-2017 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления»: методические рекомендации для студентов и преподавателей / М. Д. Баранова, А. Ю. Котова. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. – 22 с. – Текст электронный. – URL: <http://nizrp:narod.ru/recomedation.pdf>.
2. Белоусов, В. Н. Выпускная работа бакалавра: методические указания к выполнению выпускной квалификационной работы по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»: методические указания / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, С. В. Антуфьев. – СПб.: СПбГТУРП, 2015.
3. Суслов, В. А. Тепломассоперенос в элементах теплотехнического оборудования: учебное пособие / В. А. Суслов. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. – 183 с.
4. Теория тепломассообмена: учебник для вузов / [С.И. Исаев и др.]; под ред. А. И. Леонтьева. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 462 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1 – Перевод величин системы МКГСС в международную систему единиц (СИ)

Энергия	1 кал = 4,187 кДж
Сила	1 кгс = 9,81 Н
Удельный вес	1 кгс/м <sup>3</sup> = 9,81 Н/м <sup>3</sup>
Плотность	1 кгс · с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> = 9,81 кг/м <sup>3</sup>
Давление	1 кгс/см <sup>2</sup> = 9,81 Н/см <sup>2</sup>
Коэффициент динамической вязкости	1 кгс · с/м <sup>2</sup> = 9,81 (Н · с)/м <sup>2</sup>
Теплоемкость	1 ккал/(кг·град) = 4,187 кДж/(кг·К)
Энтальпия, теплота фазового превращения	1 ккал/кг = 4,187 кДж/кг
Тепловой поток	1 ккал/ч = 1,163 Вт
Плотность теплового потока	1 ккал/(м <sup>2</sup> · ч) = 1,163 Вт/м <sup>2</sup>
Объемная плотность теплового потока	1 ккал/(м <sup>3</sup> · ч) = 1,163 Вт/м <sup>3</sup>
Коэффициент теплопроводности	1 ккал/(м · ч · град) = 1,163 Вт/(м · К)
Коэффициент теплоотдачи	1 ккал/(м <sup>2</sup> · ч · град) = 1,163 Вт/(м <sup>2</sup> · К)
Коэффициент излучения	1 ккал / (м <sup>2</sup> · ч · К <sup>4</sup> ) = 1,163 Вт/(м <sup>2</sup> · К <sup>4</sup> )

Таблица 2 – Плотность  $\rho$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и удельная теплоемкость  $C$  строительных теплоизоляционных и других материалов

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t$ , °С	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$C$ , кДж/(кг·К)
Альфоль при толщине воздушных слоев 10 мм	-	-	$0,0302 + 0,85 \cdot 10^{-4}t$	-
Асбест распушенный:				
3-й сорт	340	-	$0,087 + 0,24 \cdot 10^{-3}t$	0,816
6-й сорт	650	-	$0,11 + 0,19 \cdot 10^{-3}t$	0,816
Асбестовый картон	900	-	$0,16 - 0,17 \cdot 10^{-3}t$	0,816

Асбестовый шнур	800	-	0,13 – 0,15 • 10 <sup>-3</sup> t	0,816
Асбошифер:				
с высоким содержанием асбеста	1800	20	0,17–0,35	-
с 10–50 % асбеста (сухой)	1800	20	0,64–0,52	-
Асфальт	2120	0–30	0,60–0,74	1,67
Бетон с каменным щебнем	2000	0	1,28	0,84
То же сухой	1600	0	0,84	-
Железобетон набивной	2200	0	1,55	0,84
Шлакобетон	1500	0	0,70	0,80
Бумага обыкновенная	-	20	0,14	1,51
Вата хлопчатобумажная	80	30	0,042	-
Гипс (формованный сухой)	1250	20	0,43	0,8–0,9
Глина	2000– 1600	20	0,9–0,7	0,84
Глина огнеупорная	1845	450	1,04	1,09
Гравий	1840	20	0,36	-
Дельта-древесина	-	35–70	0,21	-
Дерево:				
дуб поперек волокон	825	0–15	0,20–0,21	2,39
дуб вдоль волокон	819	12–50	0,35–0,43	2,39
сосна поперек волокон	546	0–50	0,14–0,16	2,72
сосна вдоль волокон	-	20–25	0,35–0,72	2,72
Каменный уголь:				
газовый	1420	20–100	3,6–4,0	-
обыкновенный твердый	1200– 1350	20	0,24–0,27	-
Каменноугольная пыль	730	30–150	0,12–0,13	-
Картон	-	20	0,14–0,35	1,51
Кембрик (лакированный)	-	38	0,157	-
Кирпич:				
красный машинной формовки	1800	0	0,77	0,88
красный ручной формовки	1700	0	0,70	0,88
силикатный	1900	0	0,81	0,84
Кладка из красного кирпича:				
на холодном растворе	1700	0	0,8J	0,88

на теплом растворе	1600	0	0,67	0,84
Кладка из силикатного кирпича:				
на холодном растворе	1900	0	0,87	0,84
на теплом растворе	1700	0	0,76	0,80
Кладка бутовая из камней средней плотности	2000	0	1,28	0,88
Карболит черный	1150	50	0,231	-
Кожа	-	20	0,14–0,16	-
Кокс порошкообразный	449	100	0,191	1,21
Котельная накипь:				
богатая гипсом	2000–2700	100	0,7–2,3	-
богатая известью	1000–2500	100	0,15–2,3	-
богатая силикатом	300–1200	100	0,08–0,23	-
Кварц кристаллический:				
поперек оси	-	0	0,72	-
вдоль оси	-	0	1,94	-
Ламповая сажа	165	40	0,07–0,12	-
Лед	917	0	2,2	2,26
Лед	928	-100	3,5	1,17
Льняная ткань	-	-	0,088	-
Магнезия в форме сегментов для изоляции труб	266	50–200	0,073–0,084	-
Мел	2000	50	0,9	0,88
Миканит	-	20	0,21–0,41	-
Мрамор	2800	0	3,5	0,92
Парафин	920	20	0,27	-
Песок речной мелкий (сухой)	1520	0–160	0,30–0,38	0,80
Песок речной мелкий (влажный)	1650	20	1,13	2,09
Прессшпан	-	20–50	0,26–0,22	-
Плексиглас	-	20	0,184	-
Пробковые плиты сухие	148–198	80	0,042–0,053	1,76
Пробковая мелочь, величина куска 4–5 мм	85	0,60	0,044–0,058	1,76
Резина:				
твердая обыкновенная	1200	0–100	0,157–0,160	1,38
мягкая	-	20	0,13–0,16	1,38
Сахарный песок	1600	0	0,58	1,26

Сера ромбическая	-	21	0,28	0,762
Сланец	-	94	1,49	-
Слюда (поперек слоев)	2600– 3200	20	0,46–0,58	-
Снег:				
свежевыпавший	200	-	0,10	2,09
уплотненный	400	-	0,46	2,09
Стекло:				
зеркальное	2550	0–100	0,78–0,88	0,779
обыкновенное	2500	20	0,74	0,67
термометрическое	2590	20	0,96	-
пирекс	-	0	1,04	-
пирекс	-	400	1,55	-
кварцевое	-	400	1,76	-
кварцевое	-	800	2,40	-
кварцевое	-	1200	3,05	-
Стекловолоконная вата	154–206	88	0,051–0,059	-
Текстолит	1300– 1400	20	0,23–0,34	1,46– 1,51
Фарфор	2400	95	1,04	1,09
Фарфор	2400	1055	1,96	1,09
Фибра красная	1290	20–100	0,46–0,50	-
Фибролит	360–440	80	0,073–0,128	-
Целлулоид	1400	30	0,21	-
Шелк	100	0–93	0,043–0,06	-
Эбонит	1200	20	0,157–0,17	-
Шлак:				
котельный	1000	0	0,29	0,75
доменный	500		0,15	0,75
гранулированный		0		
Штукатурка:				
известковая	1600	0	0,70	0,84
цементно-песчаная	1800	0	1,2	0,84
Фанера клееная	600	0	0,15	2,51
Древесный уголь кусковой	190	80	0,074	-



Таблица 3 – Физические свойства сухого воздуха при  $p_B = 760$  мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p$ кДж/(кг · К)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м · К)	$a \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /К	$\mu \cdot 10^6,$ Па · с	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$Pr$
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-2.0	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Таблица 4 – Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho,$ кг/м <sup>3</sup>	$h,$ кДж/кг	$C_p,$ кДж/ (кг · К)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/ (м · К)	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^4,$ Н/м	$Pr$
0	1,013	999,9	0	4,212	55,1	1,789	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	1,306	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,9	4,183	59,9	1,006	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	0,805	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	0,659	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	0,556	676,9	3,54
60	1,013	983,1	251,1	4,179	65,9	0,478	663,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	0,415	643,5	2,55
80	1,013	971,8	355,0	4,195	67,4	0,365	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	0,326	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	0,295	586,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	0,272	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,350	68,6	0,252	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	0,233	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	0,217	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	0,203	484,6	1,17
160	6,18	907,0	675,4	4,316	68,3	0,191	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	0,181	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	0,173	422,8	1,00
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	0,165	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	0,158	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	0,153	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	0,148	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	0,145	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,756	62,8	0,141	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,814	61,8	0,137	261,9	0,86
260	46,94	784,0	1135,7	4,919	60,5	0,135	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,7	5,070	59,0	0,133	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	0,131	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	0,129	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	0,128	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	0,128	120,7	1,03
320	112,9	667,1	1462,1	6,574	50,6	0,128	98,10	1,11
330	128,6	640,2	1526,2	7,244	48,4	0,127	76,71	1,22
340	146,1	610,1	1594,8	8,165	45,7	0,127	56,70	1,30
350	165,4	574,4	1671,4	9,504	43,0	0,126	38,16	1,60
360	186,7	528,0	1761,5	13,98	39,5	0,126	20,21	2,35
370	210,5	450,5	1892,5	40,32	33,7	0,126	4,709	6,79

Таблица 5 – Физические свойства дымовых газов

(В = 1,01 · 10<sup>5</sup> Па; P<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 0,13; P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 0,11; P<sub>N<sub>2</sub></sub> = 0,76)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,24-0	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Таблица 6 – Физические свойства трансформаторного масла в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\mu \cdot 10^4, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{К}^{-1}$	Pr
0,0	892,5	1,549	0,1123	629,8	70,50	8,14	6,80	866
10	886,4	1,620	0,1115	335,5	37,90	7,83	6,85	484
20	880,3	1,666	0,1106	198,2	22,50	7,56	6,90	298
30	874,2	1,729	0,1098	128,5	14,70	7,28	6,95	202
40	868,2	1,788	0,1090	89,4	10,30	7,03	7,00	145
50	862,1	1,846	0,1082	65,3	7,58	6,80	7,05	111
60	856,0	1,905	0,1072	49,5	5,78	6,58	7,10	87,8
70	850,0	1,964	0,1064	38,6	4,54	6,36	7,15	71,3
80	843,9	2,026	0,1056	30,8	3,66	6,17	7,20	59,3
90	837,8	2,085	0,1047	25,4	3,03	6,00	7,25	50,5
100	831,8	2,144	0,1038	21,3	2,56	5,83	7,30	43,9
110	825,7	2,202	0,1030	18,1	2,20	5,67	7,35	38,8
120	819,6	2,261	0,1022	15,7	1,92	5,50	7,40	34,9

Таблица 7 – Физические свойства ряда расплавленных металлов

Наименование металлов	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$	$C_p, \text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$Pr \cdot 10^2$
Ртуть Hg $t_{\text{пл}} = -38,9^\circ\text{C}$ ; $t_{\text{кип}} = 357^\circ\text{C}$ ; $r_{\text{пл}} = 11,72 \text{ кДж/кг}$ ; $r_{\text{ис}} = 291,8 \text{ кДж/кг}$	20	13 550	7,90	0,1390	4,36	11,4	2,72
	100	13 350	8,95	0,1373	4,89	9,4	1,92
	150	13 230	9,65	0,1373	5,30	8,6	1,62
	200	13 120	10,3	0,1373	5,72	8,0	1,40
	300	12 880	11,7	0,1373	6,64	7,1	1,07
Олово Sn $t_{\text{пл}} = 231,9^\circ\text{C}$ ; $t_{\text{кип}} = 2270^\circ\text{C}$ ; $r_{\text{пл}} = 58,2 \text{ кДж/кг}$ ; $r_{\text{ис}} = 3015 \text{ кДж/кг}$	250	6980	34,1	0,255	19,2	27,0	1,41
	300	6940	33,7	0,255	19,0	24,0	1,26
	400	6865	33,1	0,255	18,9	20,0	1,06
	500	6790	32,6	0,255	18,8	17,3	0,92
Висмут Bi $t_{\text{пл}} = 271^\circ\text{C}$ ; $t_{\text{кип}} = 1477^\circ\text{C}$ ; $r_{\text{пл}} = 50,2 \text{ кДж/кг}$ ; $r_{\text{ис}} = 855,4 \text{ кДж/кг}$	300	10 030	13,0	0,151	8,61	17,1	1,98
	400	9910	14,4	0,151	9,72	14,2	1,46
	500	9785	15,8	0,151	10,8	12,2	1,13
	600	9660	17,2	0,151	11,9	10,8	0,91
Литий Li $t_{\text{пл}} = 179^\circ\text{C}$ ; $t_{\text{кип}} = 1317^\circ\text{C}$ ; $r_{\text{пл}} = 661,5 \text{ кДж/кг}$ ; $r_{\text{ис}} = 19595 \text{ кДж/кг}$	200	515	37,2	4,187	17,2	111,0	6,43
	300	505	39,0	4,187	18,3	92,7	5,03
	400	495	41,9	4,187	20,3	81,7	4,04
	500	484	45,3	4,187	22,3	73,4	3,28
Сплав 56,5% Bi+43,5 %Pb $t_{\text{пл}} = 123,5^\circ\text{C}$ ; $t_{\text{кип}} = 1670^\circ\text{C}$	150	10 550	9,8	0,146	6,39	28,9	4,50
	200	10 490	10,3	0,146	6,67	24,3	3,64
	300	10 360	11,4	0,146	7,50	18,7	2,50
	400	10 240	12,6	0,146	8,33	15,7	1,87
	500	10 120	14,0	0,146	9,44	13,6	1,44
Сплав 25% Na + 75% K $t_{\text{пл}} = -11^\circ\text{C}$ ; $t_{\text{кип}} = 784^\circ\text{C}$	100	852	23,2	1,143	23,9	60,7	2,51
	200	828	24,5	1,072	27,6	45,2	1,64
	300	808	25,8	1,038	31,0	36,6	1,18
	400	778	27,1	1,005	34,7	30,8	0,89
	500	753	28,4	0,967	39,0	26,7	0,69
	600	729	29,6	0,934	43,6	23,7	0,54
	700	704	30,9	0,900	48,8	21,7	0,44
Натрий Na $t_{\text{пл}} = 97,8^\circ\text{C}$ ; $t_{\text{кип}} = 883^\circ\text{C}$ ; $r_{\text{пл}} = 113,26 \text{ кДж/кг}$ ; $r_{\text{ис}} = 4208 \text{ кДж/кг}$	150	916	84,9	1,356	68,3	59,4	0,87
	200	903	81,4	1,327	67,8	50,6	0,75
	300	878	70,9	1,281	63,0	39,4	0,63
	400	854	63,9	1,273	58,9	33,0	0,56
	500	829	57,0	1,273	54,2	28,9	0,53

Таблица 8 – Коэффициент теплового излучения различных материалов

Материал и характер поверхности	$t, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$
Металлы		
Алюминий:		
полированный	225–575	0,039–0,057
шероховатый	26	0,055
окисленный при 600 °С	200–600	0,11–0,19
Вольфрам	230–2230	0,053–0,31
Вольфрамовая нить	3300	0,39
Железо:		
электролитное, тщательно полированное	175–225	0,052–0,064
сварочное, тщательно полированное	40–250	0,28
полированное	425–1020	0,14–0,377
свежеобработанное наждаком	20	0,242
литое необработанное	925–1115	0,87–0,95
Стальное литье полированное	770–1040	0,52–0,56
Сталь:		
листовая шлифованная	940–1100	0,52–0,61
окисленная при 600 °С	200–600	0,79
окисленная, шероховатая	40–370	0,94–0,97
Чугун:		
полированный	200	0,21
обточенный	830–990	0,60–0,70
окисленный при 600 °С	200–600	0,64–0,78
шероховатый, сильно окисленный	40–250	0,96
Золото, тщательно полированное	225–625	0,018–0,035
Латунь:		
тщательно полированная, состав (по массе) 73,2 % Си, 26,7 % Zn	245–355	0,028–0,031
прокатанная с естественной поверхностью	22	0,06
тусклая	50–350	0,22
окисленная при нагреве до 600°С	200–600	0,61–0,59
Медь:		
тщательно полированная электролитная	80	0,018
полированная	115	0,023

продолжительно нагревшаяся, покрытая толстым слоем окиси	25	0,78
окисленная при нагреве до 600 °С	200–600	0,57–0,55
Платина чистая полированная	225–625	0,054–0,105
Платиновые: лента	925–1115	0,12–0,17
нить	25–1230	0,036–0,192
проволока	225–1375	0,073–0,182
Хром	38–538	0,08–0,26
Огнеупорные, строительные, термоизоляционные и другие материалы		
Асбестовый картон	24	0,96
Огнеупорные материалы: слабо излучающие	500–1000	0,65–0,75
сильно излучающие	500–1000	0,80–0,90
Динасовый кирпич шероховатый: неглазурованный	1000	0,8
глазурованный	1100	0,85
Шамотный кирпич глазурованный	1100	0,75
Красный кирпич шероховатый	20	0,33
Фарфор глазурованный	22	0,92
Штукатурка шероховатая известковая	10–90	0,91
Ламповая сажа, слой 0,075 мм и толще	40–370	0,95

Таблица 9 – Теплофизические свойства пара на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$P$ , бар	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , н·сек/ м <sup>2</sup>	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$Pr$
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,136	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1910,7	8,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,953	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	17,76	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	18,25	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	18,84	0,794	1,75
270	55,0	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,234	5,489	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	20,60	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	21,29	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	21,98	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	22,86	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	23,94	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,081	25,21	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564,5	893,1	16,24	10,70	0,058	26,58	0,234	4,03
360	186,74	133,0	2481,2	719,7	23,03	12,79	0,039	29,14	0,302	5,23
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,015	33,75	0,156	11,1